



**ADELINO GOMES DA
COSTA CERVA**

**CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
CADEIRA DE LAZER**



**ADELINO GOMES DA
COSTA CERVA**

**CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
CADEIRA DE LAZER**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

O Júri

Presidente

Prof. Doutor Francisco Queirós de Melo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António José Vilela Pontes

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho

Prof. Doutor Carlos Alexandre Bento Capela

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Prof. Doutor José António de Oliveira Simões

Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível com a ajuda de muitas pessoas, às quais quero deixar aqui os meus agradecimentos:

Ao Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, por me ter permitido desenvolver este trabalho e pelo seu contributo científico, amizade e disponibilidade ao longo deste trabalho;

Ao Professor Doutor Paulo Bártolo, pela amizade, forte incentivo e constante disponibilidade;

Ao Professor Doutor José Simões, pelas correcções e cooperação no trabalho;

Ao Professor Doutor Fernando Antunes, pelas contribuições que enriqueceram este trabalho;

Ao Mestre Artur, pela amizade, constante disponibilidade e pelas grandes contribuições que enriqueceram este trabalho;

Ao Eng. Luís Miguel, pela amizade e disponibilidade que contribuiu para o enriquecimento deste trabalho;

Ao Dr. Artur Sousa, pela amizade e disponibilidade que contribuiu para o enriquecimento deste trabalho;

Ao Professor Doutor Fernando Neto, pela cooperação no trabalho;

Aos alunos da ESAD do IPL, pela colaboração nos trabalhos que envolveram o design de concepção do protótipo de cadeira;

A todos os meus amigos que contribuíram para que o meu sonho se realizasse;

Aos meus pais;

Aos meus filhos João, Adriana e Bruno, pela paciência e muito apoio ao longo destes anos.

A todos o meu OBRIGADO

Adelino Cerva

Palavras-chave

Materiais compósitos, espumas de poliuretano, caracterização mecânica

Resumo

O presente trabalho de investigação surgiu na sequência da necessidade de se desenvolver e otimizar um conjunto de materiais para aplicação num protótipo de uma cadeira de conforto.

Estruturas em material compósito com fibras de carbono têm vindo a ter, cada vez mais, um papel chave em aplicações estruturais. As vantagens apresentadas por essas estruturas estão relacionadas com a sua baixa densidade, elevada resistência mecânica e rigidez.

Este trabalho pretende seleccionar e caracterizar materiais compósitos com fibras de carbono para a construção de cadeiras ergonómicas e de lazer. Seu principal objectivo é otimizar as interações entre o homem e o meio envolvente, visando promover a segurança, saúde e bem-estar do utilizador. Durante a fase de desenvolvimento de uma cadeira, um software de avaliação postural foi utilizado para avaliar a ergonomia e funcionalidade dos componentes de projecto.

Foi efectuado um estudo de caracterização de materiais compósitos de matriz epóxida, com um número diferente de camadas de fibra de carbono, moldados pelo processo de moldagem manual com uma cura de vácuo. Ensaios de DMA foram realizados em flexão em 3 pontos, para determinar as curvas de variação do módulo com a temperatura e determinar a gama de temperaturas de serviço. A temperatura de transição vítrea também foi obtida. A partir dos ensaios de impacto foi possível concluir que a energia absorvida pelos materiais compósitos depende do número de camadas, como seria de esperar. Este trabalho permitiu ter um melhor conhecimento da influência do número de camadas nas propriedades mecânicas e suas características.

Foram, também, estudadas espumas de poliuretano com diferentes concentrações de isocianato e temperaturas de cura. Este estudo irá permitir um melhor conhecimento deste tipo de materiais, para ser possível a sua utilização no protótipo em desenvolvimento.

Um modelo numérico foi desenvolvido, para estudar o comportamento estrutural do protótipo de cadeira.

Keywords

Composite materials, polyurethanes (PU) foams, mechanical characterization

Abstract

The present investigation work was developed in order to optimize a set of materials to apply on a comfort chair prototype.

Carbon fibre structures are emerging as a key material in structural applications. The advantages presented by these structures are related with low density, high mechanical resistance and rigidity.

This work intends to choose and characterize composite materials with carbon fibres for the construction of ergonomic and leisure chairs. Its main objective is to optimize interactions between man and his surroundings, aiming at promoting user safety, health and well being. During the development phase of a chair, a postural evaluation software was used to evaluate the ergonomics and functionality of the design components. This postural evaluation has produced a physical model used to test its "design".

A study of composite material characterization of an epoxy matrix, with a different number of carbon fibre layers, moulded through the manual moulding process with a vacuum cure. Specialized analytical models were developed for the calculation of linear elasticity.

DMA tests were performed, dynamic tests in 3 point flexural loads to determine the curves relating module variation with the temperature. The vitro transition temperature was also obtained.

We can conclude from the impact tests obtained with low speed that the energy absorbed by composite materials depends on the number of layers. This study allows us to get a better understanding of the influence the number of blades have in the mechanical properties and its characteristics.

Polyurethanes (PU) foams with different poly-isocyanates concentrations and different cure temperatures were also studied. This investigation will allow a better knowledge of this kind of materials in order to allow their use on the developing prototype.

A numerical model was developed to study the structural performance.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO E ESTRUTURA DA TESE	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 Materiais compósitos	27
2.1.1 Classes de materiais compósitos	27
2.1.2 Materiais compósitos e técnicas de processamento de compósitos de matriz epoxídica com fibras.....	29
2.1.3 Avaliação de propriedades	30
Leis constitutivas para a camada	31
Leis constitutivas para o laminado.....	34
Regra das misturas.....	38
Materiais compósitos solicitados a cargas de impacto.....	41
Danos causados pelas cargas de impacto.....	42
2.2 Materiais poliuretanos	44
2.2.1 Técnicas de processamento de poliuretanos	45
Áreas de aplicação de poliuretanos.....	49
Classificação dos poliuretanos	51
2.2.2 Processo de cura	55
2.2.3 Moldação de espumas flexíveis de poliuretano, pelo processo de cura a quente.	56
2.2.4 Moldação de espumas flexíveis de poliuretano, pelo processo de cura a frio.	57
Processo de cura – Modelos numéricos.....	58
Conservação de massa	59
Modelos cinéticos	61
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	64
3.1 Introdução	65
3.2 Materiais e procedimentos experimentais	65
Materiais	65
Técnica de processamento de compósitos de matriz epoxídica com fibras de carbono	67
Ensaio estáticos de tracção	69
DMA (Dynamic Mechanical Analysis).....	76

Técnicas de caracterização aplicadas ao poliuretano.....	79
Aquisição de dados calorimétricos	80
4 RESULTADOS.....	86
4.1 Introdução	87
4.2 Materiais compósitos de matriz epoxídica com fibras de carbono	87
4.2.1 Propriedades mecânicas: ensaios estáticos (de tracção)	88
4.2.2 Propriedades mecânicas	93
4.2.3 Ensaios de impacto.....	94
4.3 Espumas de poliuretano	97
5 CASO DE ESTUDO	106
5.1 Introdução	107
5.2 Estudo de mercado.....	108
5.3 Análise Swot	114
5.4 Projecto conceptual	115
Moldação do protótipo de cadeira	115
Ergonomia e antropometria	115
Protótipo conceptual	120
Análise numérica	121
6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	123
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Análise da evolução do comércio internacional - saídas.	20
Figura 1.2 – Principais domínios e variáveis para o processo de desenvolvimento rápido de produto do século XXI.....	23
Figura 2.1 – Principais tipos de reforço usados em materiais compósitos [3].	29
Figura 2.2 – Referencial global (x, y, z) e local (L, T, Z) [3].....	33
Figura 2.3 – Referencial (x, y, z) do laminado e campo de deslocamentos na TCL [6]	35
Figura 2.4 – Referência de cada camada em relação à superfície média do laminado [7]	37
Figura 2.5 – Alta energia de impacto versus dano [11]	43
Figura 2.6 – Média energia de impacto versus dano [11]	43
Figura 2.7 – Baixa energia de impacto versus dano [11]	43
Figura 2.8 – Representação esquemática de um equipamento RIM para processamento de poliuretanos.	46
Figura 2.9 – Variantes do processo de moldação RIM.....	47
Figura 2.10 – Fibras utilizadas nos processos de moldação por SRIM: fibras de carbono, kevlar, vidro em tecido e em manta.....	48
Figura 2.11 – Planta brasileira Ricinus Communis.....	52
Figura 2.12 – Classificação das espumas	54
Figura 3.1 – Tecido de fibras de carbono utilizadas no fabrico dos materiais desenvolvidos.	65
Figura 3.2 – Procedimento utilizado no fabrico de placas em material compósito de matriz epoxídica com fibras de carbono	67
Figura 3.3 – Representação esquemática do processo de fabrico manual de componentes em compósitos de matriz epoxídica com fibras de carbono.....	68
Figura 3.4 – (a) Máquina usada nos ensaios de tracção; (b) Extensómetro usado nos ensaios de tracção.....	71
Figura 3.5 – Geometria dos provetes de tracção (dimensões em mm).	72
Figura 3.6 – Montagem utilizada na tracção dos provetes.....	72
Figura 3.7 – Provette instrumentado (extensómetros GFLA-3-50)	73
Figura 3.8 – Máquina de ensaios de impacto IMATEK IM30.....	74
Figura 3.9 – Configuração do ensaio segundo a norma ISO 6633.....	74
Figura 3.10 – Local de apoio do provete.....	75
Figura 3.11 – Balança electrónica de precisão usada na determinação das densidades.	76
Figura 3.12 – Esquema do equipamento Tritec 2000 e funcionamento.....	77
Figura 3.13 – Modos de operação de um equipamento DMA a) compressão/penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tracção; e) flexão em três pontos.....	78
Figura 3.14 – Equipamento DMA usado nos ensaios de caracterização das espumas de poliuretano [21]	79
Figura 3.15 – Calorímetro de mistura e reacção (C80 da Setaram).....	80
Figura 3.16 – Calorímetro C80 da Setaram com um sistema de mistura implementado.....	82

Figura 3.17 – DSC com um sistema de aquisição em cilindro (Calvet, 1948; thermally decoupled Sample Containers; according to Hemminger 1994) [30].....	83
Figura 3.18 – Montagem do provete de ensaio	85
Figura 4.1 – Tensão de rotura para os vários compósitos de matriz epoxídica com diferente número de camadas de fibra de carbono.	91
Figura 4.2 – Comparação entre os módulos de Young teóricos e experimentais.	92
Figura 4.3 – Módulo de Young [GPa] versus temperatura [°C] para os vários materiais compósitos de fibra de carbono.	93
Figura 4.4 – Temperatura de transição vítrea para o material compósito com seis camadas de fibra de carbono.....	94
Figura 4.5 – Energia absorvida [J] versus número de camadas.....	95
Figura 4.6 – Energia absorvida [J] versus tempo [ms].....	95
Figura 4.7 – Energia absorvida [J] versus energia de impacto [J] – amostra com 4 camadas de fibra de carbono.	96
Figura 4.8 – Energia absorvida [J] versus energia de impacto [J] – amostra com 2 camadas.	96
Figura 4.9 – a) Amostra com 2 camadas de fibra de carbono e b) amostra com 4 camadas de fibra de carbono após o impacto a h=0.5 m.	97
Figura 4.10 – Variação da estrutura das amostras de espuma flexível por injeção.....	98
Figura 4.11 – Temperatura de cura 30°C, módulo E versus concentração de isocianato versus temperatura de teste.	99
Figura 4.12 – Temperatura de cura 50°C, módulo E versus concentração de isocianato versus temperatura de teste.	99
Figura 4.13 – Temperatura de cura 75°C, módulo E versus concentração de isocianato versus temperatura de teste.	100
Figura 4.14 – Temperatura de cura 100°C, módulo E versus concentração de isocianato versus temperatura de teste.	100
Figura 4.15 – Concentração de isocianato 35.5%, módulo E versus temperatura de cura	101
Figura 4.16 – Concentração de isocianato 40%, módulo E versus temperatura de cura	101
Figura 4.17 – Concentração de isocianato 50%, módulo E versus temperatura de cura	102
Figura 4.18 – Concentração de isocianato 60%, módulo E versus temperatura de cura	102
Figura 4.19 – Variação do módulo E versus temperatura de teste para diferentes temperatura de cura.....	103
Figura 4.20 – Variação do módulo E versus temperatura de teste para diferentes concentrações de isocianato.	103
Figura 4.21 – Módulo de Young e polimerização (conversão) em função da temperatura de cura e temperatura de ensaio para uma composição de 60% de isocianato.	104
Figura 4.22 – Módulo de Young e conversão parcial em função da concentração de isocianato e temperatura de ensaio para uma temperatura de cura 50°C.	104

Figura 4.23 – Dados obtidos a partir das experiências DSC-C80: a) conversão parcial <i>versus</i> tempo de cura para diferentes conteúdos de isocianato; b) conversão parcial <i>versus</i> tempo de cura para diferentes temperaturas de cura	105
Figura 5.1 – Processo de desenvolvimento de produto.....	108
Figura 5.2 – Tipologias de cadeiras	109
Figura 5.3 – Tipologias de cadeiras em função da verticalidade (do corpo) e flexibilidade de uso	110
Figura 5.4 – Relação qualidade/ inovação dos vários fabricantes de cadeiras	112
Figura 5.5 – Posições várias do corpo humano.....	113
Figura 5.6 – Modelos possíveis de cadeiras.....	113
Figura 5.7 – Optimização ergonómica – CATIA V5.	116
Figura 5.8 – Optimização ergonómica – Rula.....	116
Figura 5.9 – Design do protótipo da cadeira de lazer	118
Figura 5.10 – Design do protótipo da cadeira	118
Figura 5.11 – Representação esquemática dos vários componentes da cadeira	119
Figura 5.12 – Equipamento Thermojet.....	120
Figura 5.13 – Protótipo em cera.....	120
Figura 5.14 – Condições de Malha de elementos finitos e condições fronteira.	121
Figura 5.15 – Campo de tensões.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características das Variantes do processo de moldação RIM.	47
Tabela 3.1 – Principais características do tecido de fibras de carbono usado.	66
Tabela 3.2 – Principais características da resina epoxídica 520 e endurecedor 523.....	66
Tabela 3.3 – Espessuras dos compósitos com diferentes números de camadas de carbono.....	78
Tabela 3.4 – Plano das experiências	84
Tabela 4.1 – Resultados relativos aos valores médios e desvios padrão das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tracção.	89
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios mecânicos de tracção.....	90
Tabela 4.3 – Resultados relativos aos valores médios das densidades por número de camadas de fibra de carbono.....	92
Tabela 5.1 – Dados antropométricos da população americana	117

NOMENCLATURA

Acrónimo	Descrição
cm	Centímetro
E	Módulo (Pa)
E_I	Energia de Impacto (J)
g	Grama
h	Hora
J	Joule
m	Metro
mm	Milímetro
min	Minuto
s	Segundo
T_g	Temperatura de transição vítrea (°C)
V_I	Velocidade de Impacto (m/s)
TCL	Teoria clássica de laminados
ν	Fracção volúmica
kg	Quilograma
G	Módulo de rigidez
ν	Coeficiente de Poisson
T_{cura}	Temperatura de cura
μ	Viscosidade dinâmica

1. INTRODUÇÃO E ESTRUTURA DA TESE

A indústria de mobiliário e de decoração tem um papel significativo na economia portuguesa, principalmente na área do conforto. De acordo com os dados do Instituto Nacional de Estatística, este sector representou entre Janeiro e Abril de 2007, 3% dos produtos vendidos ao exterior, tal como se indica na figura 1.1.

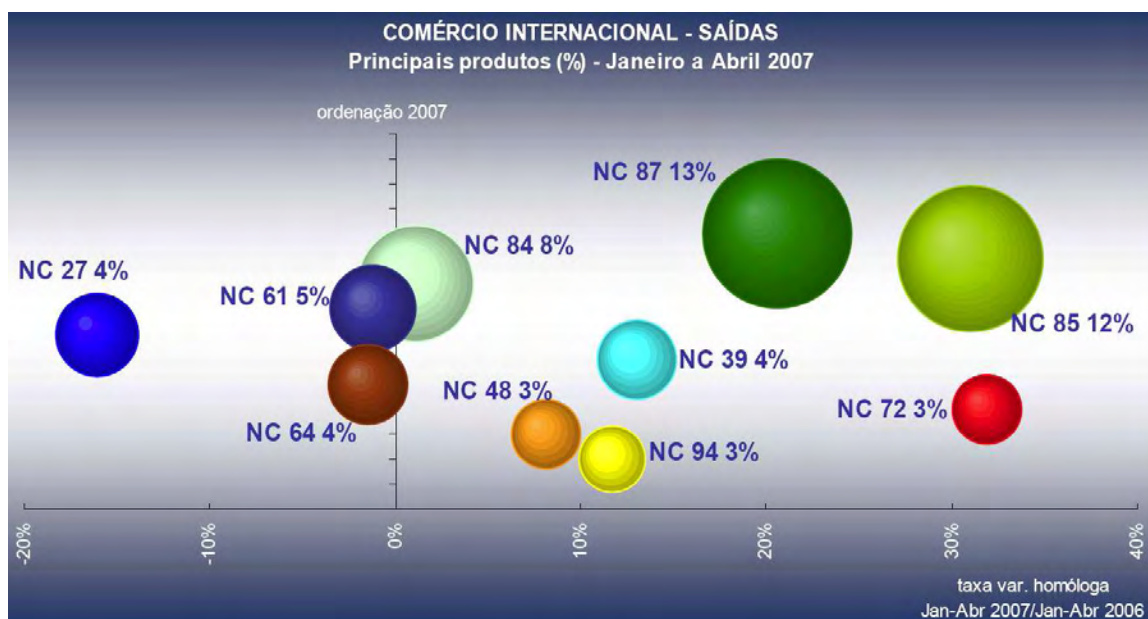


Figura 1.1 – Análise da evolução do comércio internacional - saídas.

Legenda:

- NC 03 - Peixes e crustáceos, moluscos e outros invertebrados
- NC 27 - Combustíveis minerais e óleos minerais
- NC 30 - Produtos farmacêuticos
- NC 39 - Plásticos
- NC 48 - Papel e cartão
- NC 61 - Vestuário
- NC 64 - Calçado
- NC 72 - Ferro e aço
- NC 84 - Reactores nucleares, caldeiras e máquinas.
- NC 85 - Aparelhos e materiais eléctricos
- NC 87 - Veículos automóveis, tractores, e outros veículos
- NC 90 - Instrumentos e aparelhos de óptica, fotografia ou cinematografia
- NC 94 - Móveis e mobiliário

Por outro lado, o sector mobiliário nacional tem vindo a caracterizar-se por uma aposta na qualidade, no design e na inovação dos seus produtos, o que lhe tem conferido o maior reconhecimento internacional. Este é igualmente um sector em que o investimento em tecnologia se mostra fundamental, permitindo-lhe o fabrico

de produtos cada vez mais individualizados e com tempos de desenvolvimento cada vez mais curtos. Longe vão os tempos em que as cozinhas e os electrodomésticos e outros dispositivos para o lar apresentavam todos a mesma cor, a mesma forma e as mesmas dimensões. Actualmente, os consumidores têm um papel mais interveniente no processo de definição do produto, ao pretenderem escolher produtos com características distintas, de acordo com os seus gostos pessoais. Tal obriga a que as empresas tenham que apresentar uma maior flexibilidade. Para tal, devem desenvolver estratégias inovadoras de desenvolvimento de produto que integrem técnicas avançadas de modelação e fabricação e que permitam o envolvimento eficaz de todos os intervenientes no processo de desenvolvimento de produto, incluindo os clientes. Esta estratégia de desenvolvimento de produto visa a redução dos tempos de desenvolvimento, redução de custos e aumento da qualidade. A qualidade de um produto tem a ver com a capacidade de este satisfazer e surpreender os clientes, da sua fiabilidade e desempenho.

No mercado amplamente globalizado dos dias de hoje, é grande a necessidade de minimizar os riscos nos desenvolvimentos dos produtos. Estudos demonstram que muitas empresas ignoram simplesmente uma etapa que é fundamental: a definição do produto em função dos factores que conduzem ao seu sucesso ou fracasso. O que todas as empresas desejam é produzir algo e naturalmente obter de alguma forma o seu sucesso comercial. Tal não é, no entanto, tarefa simples. Por exemplo, na indústria americana, em cada quatro produtos que entram no mercado, apenas um se torna num verdadeiro sucesso de mercado. Uma etapa que é fundamental para reduzir ao máximo a ocorrência de erros e o surgimento de incertezas no processo é o momento de definição do produto e como será concebido. Um produto de sucesso deve pois:

- Satisfazer as necessidades do consumidor;
- Demonstrar, de forma clara, os benefícios que fornece ao consumidor;
- Possuir qualidade superior à da concorrência;

- Poder ser ajustado para atender aos requisitos do consumidor;
- Apresentar uma boa relação custo-benefício;
- Ser facilmente comercializado;
- Incluir inovações tecnológicas.

Em mercados tão competitivos como os actuais, para que uma empresa consiga manter-se presente no mercado, deve ser capaz de:

- ***penetrar no mercado***: o que significa aumentar as vendas, tentando conquistar consumidores de empresas concorrentes;
- ***desenvolver o mercado***: tentar atrair outros tipos de consumidores para os seus produtos;
- ***desenvolver produtos***: aproveitar a quota de mercado já conquistada para introduzir um novo produto ou uma versão modificada do produto anterior;
- ***diversificar produtos e mercados***

O desenvolvimento de produtos é um processo complexo e multidisciplinar de solução de problemas. O problema do cliente deve ser traduzido em termos técnicos de modo a satisfazê-lo. Contudo, no actual contexto económico, satisfazer o cliente não é suficiente. Quando tal acontece, isto é, quando satisfazer o cliente deixa de ser um factor de diferenciação e passa a ser pré-requisito para as empresas estarem no mercado, estas devem apostar claramente na inovação, oferecendo algo mais aos seus clientes. Tal constitui uma verdadeira preocupação dos diversos sectores de uma empresa (marketing, engenharia, fabricação, etc.). Inovando as empresas, estas mantêm a sua cota de clientes e, talvez mais importante, conquistam novos clientes.

Cada vez mais atenção tem sido dada na indústria aos sectores de desenvolvimento de produtos. As modernas empresas actuam já ao nível dos

seus processos de fabrico, eliminando desperdícios e melhorando a qualidade. O novo desafio é melhorar o produto desde a sua fase de desenvolvimento conceptual. Este desafio passa pela melhoria do próprio processo de obtenção do produto. Tecnologias relativamente recentes como o desenvolvimento simultâneo de produto, novas metodologias de projecto e tecnologias avançadas de produção têm demonstrado a sua utilidade na obtenção de produtos inovadores. Estas tecnologias permitem o desenvolvimento de novos produtos com vantagens competitivas em termos de custo/tempo e qualidade. Este novo contexto industrial implica novas variáveis e metodologias para o desenvolvimento rápido de produtos inovadores e de sucesso (figura 1.2).

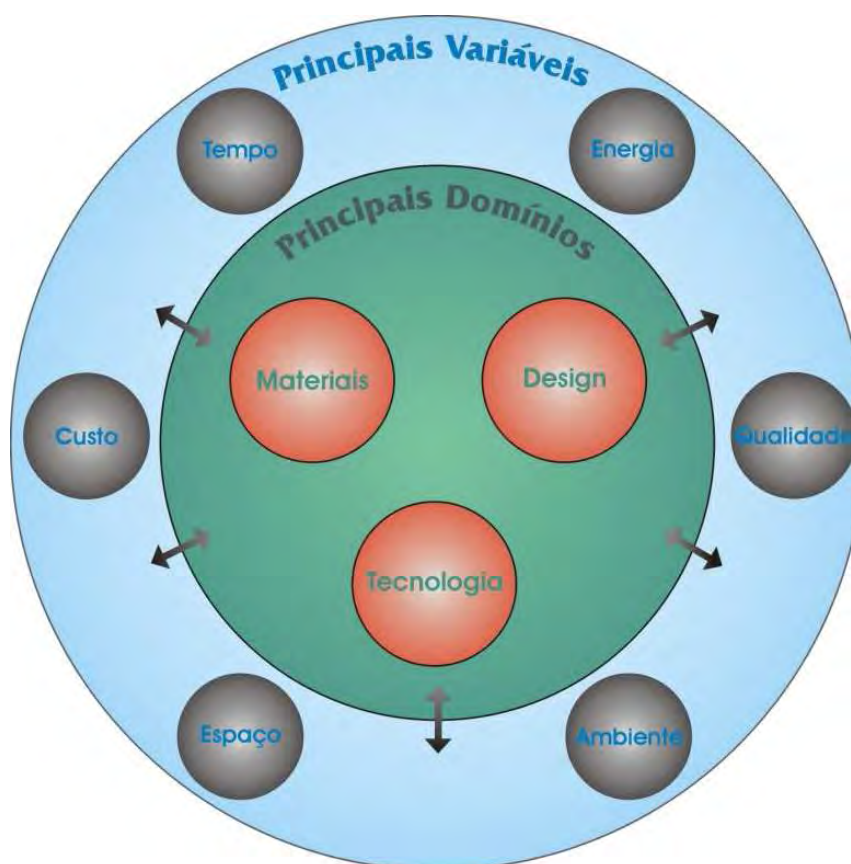


Figura 1.2 – Principais domínios e variáveis para o processo de desenvolvimento rápido de produto do século XXI

Do ponto de vista tecnológico, requer-se a utilização de tecnologias versáteis e flexíveis capazes de processar, de forma rápida, económica, sem desperdícios e

com baixos recursos energéticos e intervenção humana, que permitam a produção rápida de produtos personalizados, de elevada qualidade ao nível do sector imobiliário em geral, e da produção de cadeiras de lazer em particular, objectivo desde trabalho de investigação. É necessária, muitas vezes, a combinação de materiais com características muito diversas, o que implica, por um lado, um forte domínio científico por parte das empresas ao nível dos materiais e, por outro lado, a necessidade de se utilizar variadas tecnologias produtivas. O conhecimento que tal actividade requer por parte das empresas é naturalmente elevado, retirando, por vezes, capacidade de resposta em termos de flexibilidade perante novos desafios. Neste sector em particular, a utilização de uma família de materiais que possam, em função das suas características químicas, apresentar propriedades mecânicas, térmicas, etc., muito variadas e que possam ser facilmente processadas, pode constituir uma importante vantagem competitiva. A este nível, poderá assumir grande relevância a utilização das resinas poliuretanas. Estes materiais, resultantes da reacção entre um poliol e um isocianato, podem, em função destes componentes químicos, apresentar-se sob a forma rígida, flexível ou em espuma. Podem igualmente ser facilmente processados através de um processo designado por moldação com reacção (RIM - *Reaction Injection Moulding*), que envolve baixas pressões e baixos custos energéticos e, por outro lado, podem também ser combinados com outros materiais, como por exemplo fibras naturais, criando estruturas semelhantes a madeira. Este projecto de investigação visa estudar o processo de cura e as características mecânicas de diferentes estruturas em poliuretano, que constituiu o primeiro passo para o desenvolvimento de uma estratégia eficaz de utilização de poliuretanos e da tecnologia RIM no fabrico de cadeiras de lazer.

A tese encontra-se dividida em seis capítulos, que descrevem, de forma detalhada, o trabalho teórico e experimental desenvolvido. O primeiro capítulo introduz o tema da dissertação e apresenta os principais objectivos deste trabalho

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica relativa a materiais compósitos de matriz polimérica e espumas

No capítulo 3, Materiais e Procedimentos Experimentais, é efectuada a descrição dos materiais, técnicas e geometria dos provetes utilizados.

No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados relativos à caracterização dos materiais compósitos de matriz epóxida com diferente número de camadas de fibra de carbono e, também, das espumas de poliuretano. No caso dos materiais compósitos, foram avaliadas as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência mecânica).

No capítulo 5, é apresentado o protótipo de uma cadeira com design inovador e com características ergonómicas.

As conclusões e propostas para futuros trabalhos são apresentadas no capítulo 6.

2. REVISÃO

BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

O desenvolvimento destes materiais, bem como das técnicas de projecto e tecnologias de fabrico a eles associados, constituiu um dos mais importantes avanços na história dos materiais. Os materiais compósitos são materiais multifuncionais que possuem um conjunto de propriedades físicas e mecânicas fora do comum, podendo ser processadas de forma a satisfazerem uma determinada aplicação. Muitos destes materiais possuem grande resistência à temperatura, superior à temperatura ambiente, à corrosão, à oxidação e ao desgaste. Os processos de fabrico de compósitos estão hoje bem adaptados à fabricação de estruturas complexas, o que permite a consolidação de peças com custos de produção reduzidos. Estas características permitem que os compósitos sejam utilizados em muitas aplicações com vantagem em relação aos materiais monolíticos.

Actualmente os materiais compósitos são muito utilizados, não só na indústria aeroespacial, mas também num crescente número de aplicações de Engenharia Mecânica, tais como motores de combustão interna, componentes de máquinas, reservatórios de pressão, equipamentos industriais de processos que requerem resistência à corrosão a altas temperaturas, componentes sujeitos a oxidação e desgaste, estruturas náuticas, equipamentos de desporto, aparelhos aplicados em biomedicina, indústria de mobiliário e equipamentos de lazer.

2.1.1 Classes de materiais compósitos

Não existe uma definição universalmente aceite de material compósito. No entanto, este pode ser definido como um material composto pelo menos por duas fases distintas mutuamente insolúveis, das quais pelo menos uma funciona como agente de reforço [1,2,3].

Os materiais sólidos podem ser divididos em quatro grandes categorias: polímeros, metais, cerâmicos e compósitos que se consideram uma classe distinta devido às suas características específicas.

Cada uma destas categorias pode funcionar tanto como material de base como material de reforço. Através das combinações destas quatro categorias, podem ser criados novos sistemas de materiais possuindo características que não poderiam ser obtidas com um material monolítico.

Os compósitos são usualmente classificados relativamente ao material usado como matriz. Assim, existem quatro categorias de materiais compósitos: Compósito de matriz polimérica (CMP); Compósito de matriz metálica (CMM); Compósito de matriz cerâmica (CMC); Compósito de carbono/carbono (CCC).

Actualmente, a classe de compósitos mais utilizada é a CMP. No entanto, as outras classes têm já aplicações importantes, o que é representativo do seu potencial.

O agente de reforço do compósito pode assumir diferentes formas, nomeadamente: fibras alinhadas contínuas, fibras descontínuas, cristais alongados, partículas e numerosas formas de arquitecturas fibrosas produzidas por tecnologia têxtil, tais como tecidos e entrançados.

Cada vez mais, os fabricantes desenvolvem compósitos híbridos, que combinam diferentes tipos de reforço, de modo a atingir maior eficácia a custos optimizados.

A forma mais usual de representar um compósito reforçado por fibras é separar o material da matriz e a fibra de reforço por uma barra “/”. No caso de uma matriz de resina epoxídica reforçado por fibra de carbono, escreve-se “resina epoxídica/carbono” ou “Ep/C”. Se o reforço for de partículas, coloca-se a designação das partículas entre parêntesis seguidos de um “P”, ou seja, alumínio reforçado com partículas de carboneto de silício é representado por “Al/(SiC)_P”.

Na figura 2.1, estão ilustrados os principais tipos de reforço utilizados em materiais compósitos: fibras longas alinhadas, fibras descontínuas, *whiskers*

(fibras muito curtas), partículas e numerosas arquitecturas de fibras produzidas por tecnologia têxtil, tais como tecidos e malhas.

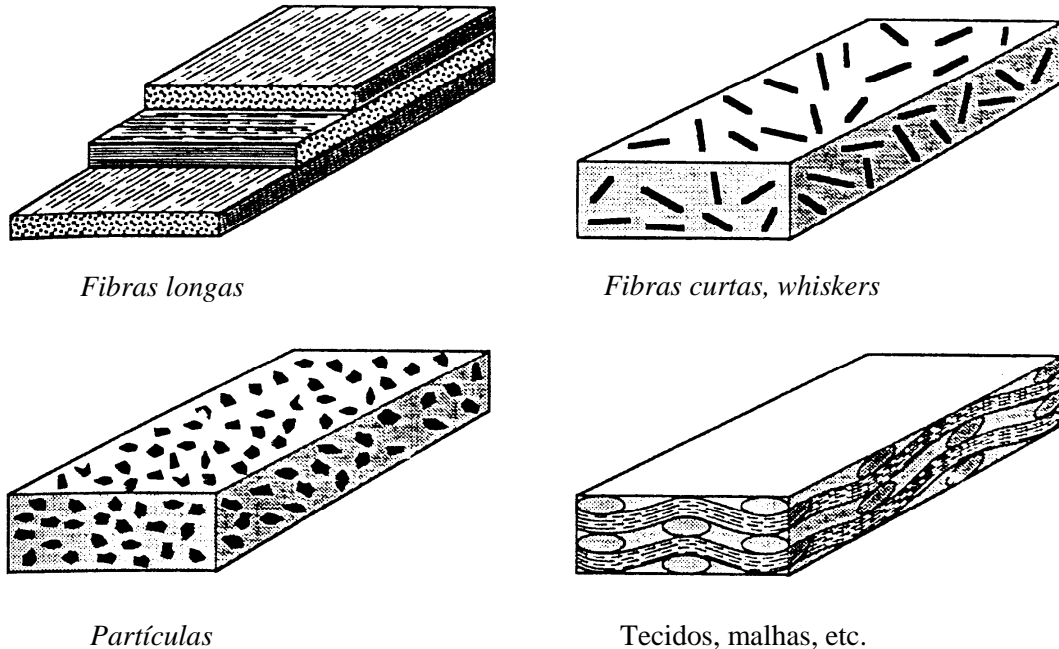


Figura 2.1 – Principais tipos de reforço usados em materiais compósitos [3].

2.1.2 Materiais compósitos e técnicas de processamento de compósitos de matriz epoxídica com fibras

A composição de materiais diferentes pode proporcionar a obtenção de um material com propriedades significativamente melhores. A utilização de fibras como reforço de matrizes poliméricas traduz-se na obtenção de materiais com resistência e rigidez mais elevadas e deste modo podem suportar maiores cargas de serviço. Os materiais de reforço utilizados nestes compósitos são, na maior parte dos casos, fibras de elevada resistência, rigidez e de diâmetros muito pequenos. São também utilizadas fibras curtas (*whiskers*) e partículas. As fibras curtas e as partículas conferem ao compósito uma menor resistência e rigidez (são usadas com orientações aleatórias), mas podem conduzir a um processo de fabrico mais fácil [4].

As matrizes poliméricas apresentam normalmente valores inferiores de rigidez e resistência relativamente aos materiais de reforço, mas são mais fáceis de moldar. Estas protegem os reforços do meio ambiente e fazem a transferência de carga entre os elementos de reforço. A selecção adequada do material da matriz e do material do reforço permite obter um novo material com boas propriedades físicas e mecânicas e de fácil processamento. As matrizes utilizadas tradicionalmente no fabrico industrial da maioria dos compósitos são de materiais termoendurecíveis.

Na literatura, pode-se analisar varias técnicas de processamento de materiais compósitos [5], desde técnicas manuais como é o caso do *hand lay-up* (moldação manual), passando por técnicas completamente automatizadas, como é o caso da bobinagem e injeção.

No fabrico de componentes estruturais obtidos a partir de materiais compósitos reforçados por fibras são utilizados rolos de fibras pré-impregnados com resina. Esses rolos são colocados sobre uma placa, que serve como superfície moldante, sendo o ângulo de deposição das fibras dependente dos requisitos de projecto. Sobre a superfície moldante deve-se colocar um elemento desmoldante para posteriormente se poder extrair a peça processada. Após a impregnação das fibras, basta submeter o conjunto a um processo de vácuo, denominado em inglês por *vacuum bagging*. A pressão existente neste processo faz com que haja uma melhor compactação do conjunto de fibras e resina e consequentemente se obtenha um componente com boas características mecânicas.

2.1.3 Avaliação de propriedades

As propriedades dos materiais compósitos são muito atractivas para serem utilizadas em projectos de componentes mecânicos, pois é possível projectar o material de acordo com as especificações do projecto. Para tal, é necessário

determinar as propriedades mecânicas visando futuras aplicações. Pode-se utilizar dois métodos:

- Determinação das propriedades mecânicas através de ensaios laboratoriais;
- Determinação das propriedades mecânicas através da regra das misturas.

Após a determinação dessas propriedades, é utilizado um procedimento de cálculo bastante comum para os materiais compósitos reforçados, que tem por base a Teoria Clássica de Laminados (TCL). Esta teoria fornece resultados aproximados, devido à complexidade das características do laminado. As propriedades elásticas de um material compósito dependem fortemente das propriedades, orientação e distribuição de cada camada [6].

É importante realçar o facto de as propriedades poderem sofrer variações significativas sob a acção da temperatura e da humidade. Em função dos objectivos do presente trabalho, foram analisados provetes à temperatura ambiente (entre 20°C e 30°C), podendo-se assim desprezar tais efeitos. Assim, as equações deduzidas seguidamente não apresentam parcelas correspondentes ao efeito do calor nem da humidade.

Leis constitutivas para a camada

A lei generalizada de Hooke, para materiais elásticos e anisotrópicos, é dada, em notação simplificada por [6],

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} , \quad (1)$$

C_{ijkl} é o tensor de 4ª ordem das propriedades elásticas. Como tem de existir equilíbrio estático, tanto as tensões como as extensões são simétricas, desta

forma, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ e $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$, ficando apenas 6 componentes de tensão e deformação, independentes. Existe, também, simetria na matriz de rigidez, o que permite reduzir o número para 36 constantes elásticas.

Desta forma, a lei de Hooke fica:

$$\sigma_i = Q_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, \dots, 6. \quad (2)$$

Verifica-se que a matriz Q é simétrica, o que permite reduzir para 21 constantes elásticas independentes [6].

Pode-se definir dois sistemas de coordenadas globais: o (x, y, z) e o dos materiais (L, T, Z) ; efectuada essa definição, a matriz de rigidez para coordenadas globais toma a forma [6]

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & Q_{44} & 0 & 0 \\ & \text{Simétrico} & & & Q_{55} & 0 \\ & & & & & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Como consequência das suas excelentes propriedades mecânicas, os laminados são utilizados geralmente sob a forma de placas relativamente finas. É possível admitir que as camadas estão sob estado plano de tensão, isto é, que as tensões na direcção da espessura σ_z , σ_{xz} e σ_{yz} têm valores desprezíveis face aos das tensões no plano xy . Deste modo, a lei de Hooke generalizada em coordenadas materiais pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{LL} & Q_{LT} & 0 \\ Q_{LT} & Q_{TT} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{TT} \end{bmatrix} \quad (4)$$

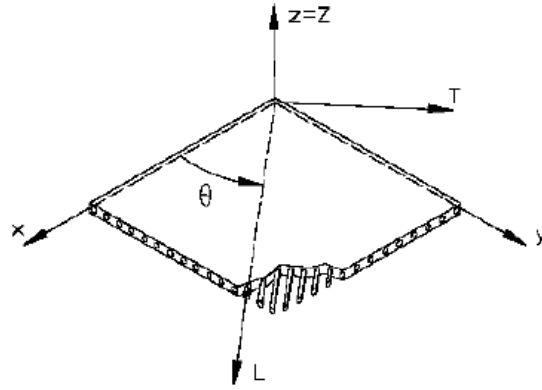


Figura 2.2 – Referencial global (x, y, z) e local (L, T, Z) [3]

A matriz de rigidez $[Q]_m$, em coordenadas materiais, pode ser relacionada com as constantes elásticas da seguinte forma:

$$[Q]_m = \begin{bmatrix} \frac{E_L}{1-\nu_{LT}\nu_{TL}} & \nu_{LT}Q_{TT} & 0 \\ \nu_{LT}Q_{TT} & \frac{E_T}{1-\nu_{LT}\nu_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

A matriz de rigidez é inversa da matriz de flexibilidade $[S]_m$:

$$[Q]_m = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 \\ \frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

As constantes de elasticidade da camada individual e as tensões no sistema de coordenadas usado podem ser relacionadas por uma matriz de transformação de coordenadas $[T^\sigma]$ [6]:

$$\{\sigma\}_m = [T^\sigma] \{\sigma\}_g \quad (7)$$

A matriz de transformação de coordenadas é dada por:

$$[T^\sigma] = \begin{bmatrix} (\cos \theta)^2 & (\sin \theta)^2 & 2 \cos \theta \sin \theta \\ (\sin \theta)^2 & (\cos \theta)^2 & -2 \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & (\cos \theta)^2 - (\sin \theta)^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Da mesma forma, é possível definir uma relação entre deformações em coordenadas materiais e coordenadas globais, através de uma transformação de coordenadas do mesmo tipo.

A relação entre tensão e extensão em coordenadas globais é dada por:

$$\{\sigma\}_m = [\bar{Q}]\{\varepsilon\}_g \Leftrightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & 0 \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (9)$$

em que a matriz \bar{Q} é obtida de Q por transformação de coordenadas.

Leis constitutivas para o laminado

A placa, ou laminado, pode ser constituída por n camadas, cuja orientação das fibras poderá variar de camada para camada. Para cada camada as relações anteriormente apresentadas são válidas.

A teoria clássica de laminados, TCL, aqui apresentada, é apenas aplicada a materiais compósitos ortotrópicos de fibras contínuas. No sistema de coordenadas genérico (x, y, z) define-se o campo de deslocamentos (u, v, w) do laminado.

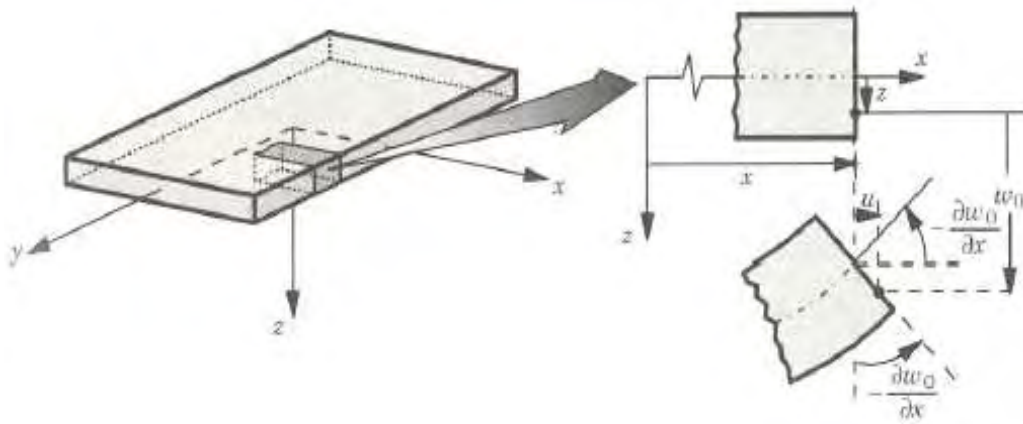


Figura 2.3 – Referencial (x, y, z) do laminado e campo de deslocamentos na TCL [6]

Os deslocamentos são inicialmente expressos por uma série de potências em z , que tomam a seguinte forma [6]:

$$u(x, y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} z^i \Phi(x, y) \quad (10)$$

$$v(x, y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} z^i \Psi(x, y)$$

$$w(x, y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} z^i \Theta(x, y)$$

O número de termos retidos, assim como as simplificações assumidas de campos de deformações permitidos, definem a forma de Φ , Ψ e Θ . As expressões u , v e w da equação anterior representam deslocamentos resultantes de forças e momentos. Para placas finas sujeitas a pequenas deformações, as simplificações assumidas são [8]:

- A deflexão da superfície média é pequena, quando comparada com a espessura da placa, bem como a rotação da placa deflectida;
- Quando a placa está sujeita a flexão pura, a extensão da linha média é nula;

- As secções planas, que inicialmente se encontram normais à linha média, permanecem normais depois de um carregamento em flexão pura;
- As condições $\sigma_z = 0$ assumem-se válidas, excepto em áreas localizadas onde grandes concentrações de cargas transversais são aplicadas.

Estas simplificações são conhecidas como a hipótese de *Kirchhoff* para placas ou de *Kirshhoff-Love* para placas finas ou cascas.

No caso dos laminados estudados, a espessura h é muito inferior às duas outras dimensões da placa e, por esse motivo, uma boa aproximação consiste em considerar apenas os primeiros termos da equação 10. Se $\gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$, então Φ e ψ podem ser definidos explicitamente em termos de w_0 . O deslocamento w é considerado constante, ficando destes modo [6]:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial x} \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w}{\partial y}, \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y) \end{aligned} \quad (11)$$

em que $u_0(x, y)$ e $v_0(x, y)$ são os deslocamentos da superfície média do laminado.

As forças de membrana actuantes num laminado são dadas pelo somatório em n camadas do integral das tensões na espessura de cada camada [6]:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i \begin{Bmatrix} \epsilon_{x_0} \\ \epsilon_{y_0} \\ \epsilon_{xy_0} \end{Bmatrix} \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz - \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz. \quad (12)$$

$$\text{Define-se } A = \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i (h_i - h_{i-1}) \text{ e } B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i (h_i^2 - h_{i-1}^2)$$

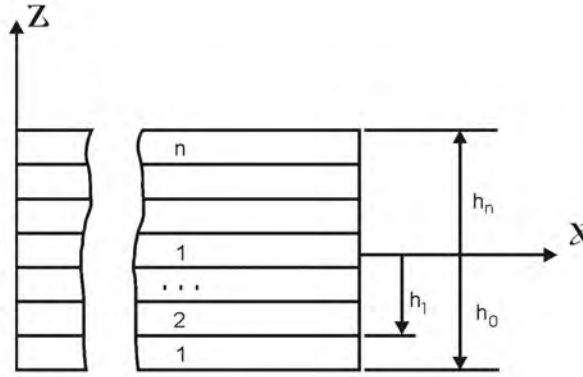


Figura 2.4 – Referência de cada camada em relação à superfície média do laminado [7]

Sendo que $a = A^{-1}$, temos:

$$\begin{aligned}
 E_x^m &= \frac{1}{a_{11}h} ; E_y^m = \frac{1}{a_{22}h} ; G_{xy}^m = \frac{1}{a_{66}h} ; \\
 G_{xy}^m &= \frac{1}{a_{66}h} ; \nu_{yx}^m = -\frac{a_{21}}{a_{11}} ; \nu_{xz}^m = \frac{a_{16}}{a_{66}} ; \\
 \nu_{zx}^m &= -\frac{a_{61}}{a_{11}} ; \nu_{yz}^m = \frac{a_{26}}{a_{66}} ; \nu_{zy}^m = -\frac{a_{62}}{a_{22}} .
 \end{aligned} \tag{13}$$

Os momentos a actuar no laminado são dados por [6]:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x_0} \\ \varepsilon_{y_0} \\ \varepsilon_{xy_0} \end{Bmatrix} \int_{h_{i-1}}^{h_i} z dz - \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \int_{h_{i-1}}^{h_i} z^2 dz \tag{14}$$

Resolvendo os integrais, define-se

$$B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i (h_i^2 - h_{i-1}^2)$$

e

$$D = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \bar{Q}^i (h_i^3 - h_{i-1}^3) .$$

Invertendo a matriz D ($d = D^{-1}$), obtém-se as propriedades mecânicas globais:

$$\begin{aligned} E_x^f &= \frac{12}{d_{11}h^3}; E_y^m = \frac{12}{d_{22}h^3}; G_{xy}^f = \frac{1}{d_{66}h^3}; \\ \nu_{xy}^f &= -\frac{d_{12}}{d_{22}}; \nu_{yx}^f = -\frac{d_{21}}{d_{11}}; \nu_{xz}^f = \frac{d_{16}}{d_{66}}; \\ \nu_{zx}^f &= -\frac{d_{61}}{d_{11}}; \nu_{yz}^f = \frac{d_{26}}{d_{66}}; \nu_{zy}^f = -\frac{d_{62}}{d_{22}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Os termos de acoplamento entre membrana e flexão estão agrupados na matriz B. Em laminados simétricos estes são termos nulos. Os laminados devem ser sempre projectados de modo a evitar acoplamento entre membrana e flexão, visto originarem distorções parasitas, difíceis de prever e analisar [6].

Regra das misturas

As fibras são consideradas homogéneas, isotrópicas ou ortotrópicas, lineares elásticas, espaçadas regularmente e alinhadas. A camada supõe-se homogénea, ortotrópica e linear elástica. É ainda considerado que existe uma perfeita ligação entre as fibras e o material da matriz. Com base nestas simplificações, pode-se correr alguns riscos, visto que algumas delas são tecnologicamente difíceis de obter.

Para um dado número de materiais constituintes, a soma das fracções volúmicas de cada um, mais a fracção correspondente à porosidade, é igual à unidade:

$$\nu_p + \sum_{i=1}^n \nu_i = 1 \quad (16)$$

em que $v_i = V_i / V_c$ é a fracção volúmica de cada material constituinte, v_p a fracção volúmica correspondente à porosidade existente, V_i, V_c são os volumes do material constituinte e do compósito, respectivamente.

As equações correspondentes no caso de fracções de massa são:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (17)$$

em que $w_i = W_i / W_c$ é a fracção em massa de cada material constituinte e W_i, W_c são a massa do constituinte e do compósito, respectivamente.

Pode-se observar que, no caso das equações da fracção de massa, a porosidade não é, obviamente, incluída. No caso de cura do compósito em autoclave, a porosidade é da ordem dos 0.1 a 1%. Sem o uso de vácuo ou outro método, as bolhas de ar existentes não são expulsas no processo de cura, podendo a porosidade chegar aos 5% [9].

Substituindo, na equação 17, a massa pelo produto da densidade e volume, obtém-se a chamada regra das misturas para a densidade:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i \quad (18)$$

As propriedades elásticas da camada são obtidas através da mecânica dos materiais, considerando a média ponderada das propriedades de cada um dos constituintes. Para estados de tensão plana são necessárias quatro constantes elásticas para a definição das leis constitutivas [7].

O volume de fibra existente no laminado pode ser determinado pela relação do peso por área [Kg/m^2] com a espessura total do laminado, sendo que o material

da matriz preenche o restante do volume, considerando então que não existe porosidade:

$$v_f = \frac{Peso}{h \times \rho_f} \quad (19)$$

A regra das misturas encontra-se em diversa bibliografia [10].

As propriedades elásticas de uma camada são resumidas por:

$$E_L = E_{f_L} v_f + E_{m_L} v_m \quad (20)$$

$$\nu_{LT} = \nu_{TL} = \nu_{f_{LT}} v_f + \nu_{m_{LT}} v_m \quad (21)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{\nu_f}{E_{f_T}} + \frac{\nu_m}{E_{m_T}} \quad (22)$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{\nu_f}{G_{f_{LT}}} + \frac{\nu_m}{G_{m_{LT}}} \quad (23)$$

em que E é o Módulo de elasticidade (ou módulo de Young) do material, G o Módulo de rigidez ao corte, ν o coeficiente de Poisson e v a fracção volúmica. Os índices m e f indicam que são constantes da matriz e fibra, L e T são as coordenadas materiais do laminado (figura 2.2).

A regra das misturas pode ser aplicada sem risco ao módulo de elasticidade longitudinal, assim como o coeficiente de *Poisson*. Para o cálculo do módulo de elasticidade transversal e módulo de rigidez ao corte, para além da regra das misturas, existem modelos semi-empíricos obtidos de curvas de ajuste de resultados experimentais de *Halpin-Tsai* e *Tsai-Hahn* [7].

Materiais compósitos solicitados a cargas de impacto

No dimensionamento de componentes estruturais em material compósito, a resistência ao impacto é um factor a ter em consideração quando se dimensiona componentes sujeitos a cargas de impacto.

As vantagens que os compósitos de elevado desempenho possuem relativamente aos metais em aplicações que requerem alta resistência, alta rigidez e baixo peso esbatem-se quando o impacto é um dos parâmetros a considerar na concepção [5].

Os eventos de impacto são normalmente classificados em impactos de alta ou baixa energia, de acordo com o valor da energia cinética inicial do impactor. Não existe uma definição exacta para eventos de impacto a baixa energia e de alta energia. No entanto, os ensaios concebidos para os dois casos são realizados em condições distintas.

Na realização de ensaios de impacto de baixa energia procura-se avaliar os defeitos introduzidos no material em consequência de cargas de impacto. Considera-se que, em princípio, a estrutura resistirá às cargas de impacto. Estes ensaios são os mais comuns na avaliação do comportamento mecânico de materiais em engenharia.

Por outro lado, nos ensaios de impacto de alta energia, pretende-se avaliar o comportamento global da estrutura, ou seja, se a mesma conseguirá manter as suas funções estruturais após o impacto. No caso de estruturas em material compósito, as cargas de impacto de alta energia podem levar ao aparecimento de danos internos, que podem comprometer a integridade da estrutura a médio ou longo prazo.

As cargas de impacto podem envolver energias até 20 J nas estruturas solicitadas. Estes valores podem variar em função do grau de dano que se pode impor, com as condições de impacto e com a geometria do impactor e da

estrutura em estudo. As velocidades de impacto dependem da massa do impactor utilizado e, de um modo geral, as velocidades na condição de impacto de baixa energia variam até 20 m/s para uma massa do impactor até 100 g.

Deve-se, no entanto, considerar que estes valores não são limitativos e a classificação do tipo de impacto depende fundamentalmente das condições de contorno do problema. Pode-se afirmar então[5]:

- Impacto a baixa velocidade – caracterizado por uma extensa zona danificada e por uma resposta da estrutura;
- Impacto a alta velocidade – caracterizado por uma solicitação transitória que provoca uma resposta de carácter localizado, podendo existir ou não perfuração.

Danos causados pelas cargas de impacto

Os danos provocados pelas energias de impacto em determinadas estruturas por vezes não são visíveis a olho nu. No caso de estruturas em metal, é possível observar um entalhe resultante da aplicação de cargas de impacto, enquanto que, no caso de estruturas em material compósito, pode não ser visível qualquer sinal de dano. No entanto, a estrutura pode estar afectada internamente. Quando se está perante altas ou médias energias de impacto, normalmente ocorrem danos severos, sendo de fácil detecção em energias de impacto baixas geralmente onde o dano não é visível. Nas figuras 2.5, 2.6 e 2.7, pode-se observar exemplos de danos causados num empilhamento [02/45/-45/0/90], consequência da aplicação de energias de impacto alta, média e baixa.

Existe uma variedade de técnicas de inspecção não destrutivas disponíveis para determinar a extensão e grau de dano, que podem ser consultadas em [7].

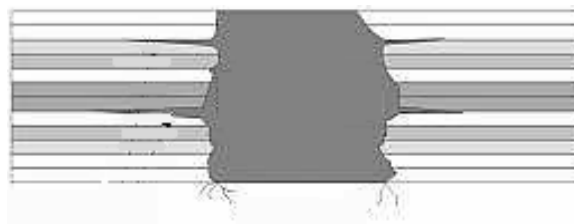


Figura 2.5 – Alta energia de impacto versus dano [11]

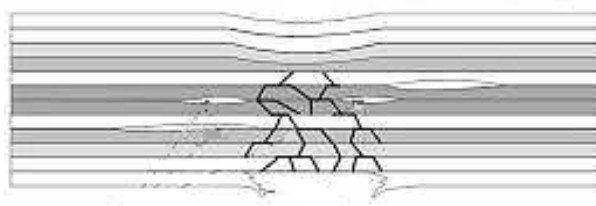


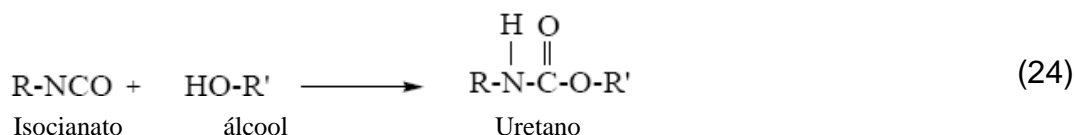
Figura 2.6 – Média energia de impacto versus dano [11]



Figura 2.7 – Baixa energia de impacto versus dano [11]

2.2 Materiais poliuretanos

Os materiais poliuretanos foram desenvolvidos por Otto Bayer (década de 1930) e são o resultado de uma reacção exotérmica de poli-adição entre um poliol e um isocianato, conforme se pode observar no esquema seguinte:



Estes materiais são utilizados no processamento por RIM (*Reaction Injection Moulding*). A natureza química e a funcionalidade dos reagentes devem ser seleccionadas em função das propriedades que se pretendem obter no processamento de componentes utilizando esta tecnologia de processamento. Assim, tem-se uma elevada gama de possíveis combinações de reagentes, o que permite a obtenção de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas. A estrutura molecular dos poliuretanos (PUS) pode variar desde polímeros lineares e flexíveis até polímeros de estrutura ramificada e rígidos.

O desenvolvimento destes materiais teve início na Alemanha, no século passado (1930), e teve como objectivo a comercialização de espumas rígidas, adesivos e tintas.

Nas décadas seguintes, assistiu-se ao desenvolvimento de espumas flexíveis e à utilização de CFCs (clorofluorcarbonos) como agente expensor de espumas rígidas. As espumas semi-flexíveis e semi-rígidas utilizadas na indústria automóvel foram introduzidas na década de 70. A partir desta altura, o consumo de poliuretanos aumentou significativamente [29], a sua utilização cobre áreas tão diversas quanto a indústria automóvel, aeronáutica, construção civil, indústria do calçado, etc.

2.2.1 Técnicas de processamento de poliuretanos

O processamento por reacção a baixa pressão é geralmente designado por RIM e é um processo que permite o fabrico rápido de componentes em plástico a partir da mistura de dois materiais reactivos e de baixa viscosidade. Estes dois materiais encontram-se em recipientes separados e sujeitos a um processo de dosagem e mistura. Em seguida, o material é injectado para a cavidade moldante do molde produzido para o efeito. Estes moldes podem ser fabricados em material de relativo baixo custo (silicone, poliuretano, etc.), devido ao facto de este processo ser feito a baixa pressão.

Existe uma grande variedade de materiais que podem ser processados, nomeadamente, poliuretano, *nylon*, resinas epoxídicas e sistemas de poliéster entre outros. Na figura 2.8, pode-se observar um esquema de um sistema de RIM para produção de peças em poliuretano, utilizando, neste caso, poliol e isocianato. A reacção de cura ocorre por mistura do poliol e do isocianato, normalmente à temperatura ambiente.

Relativamente ao processo de moldação por injeção de termoplásticos TIM (*Thermoplastic Injection Moulding*), o processo de moldação por RIM permite obter peças de grande dimensão e com massas até cerca de 50 kg, complexas e numa grande variedade de materiais. A baixa viscosidade e temperatura com que são injectados os materiais permite a produção de moldes mais simples, a um custo reduzido e fabricados em materiais impossíveis de utilizar no processo de TIM, tais como resinas epoxídicas, placas de poliuretano, silicone, resinas reforçadas, entre outros.

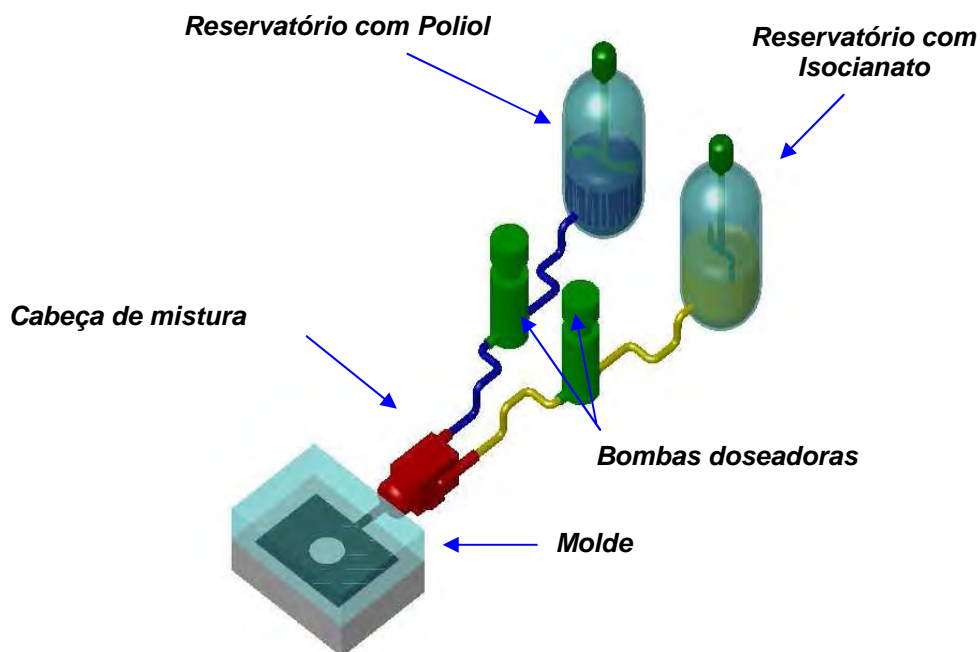


Figura 2.8 – Representação esquemática de um equipamento RIM para processamento de poliuretanos.

Como neste processo existe uma elevada quantidade de materiais com possibilidade de serem utilizados no fabrico dos moldes, o que torna o processo de moldação mais flexível e rápido, pois podem usar-se processos aditivos, substractivos, directos e indirectos para obtenção da ferramenta protótipo. Além da diminuição dos custos com o fabrico do molde, também os custos decorrentes do processo de moldação RIM são menores, devido ao menor consumo de energia e ao menor custo de investimento na compra do equipamento. Com equipamentos de pequena dimensão pode-se obter peças com dimensões relativamente grandes.

Como já foi referido, este processo permite o processamento de uma grande variedade de materiais com cargas de reforço, com fibra e sem fibra. Em função do tipo de fibras utilizadas no processamento, o processo pode-se classificar nas variantes do RIM (figura 2.9 e tabela 2.1): RRIM (Reinforced RIM) e SRIM (Structural RIM).

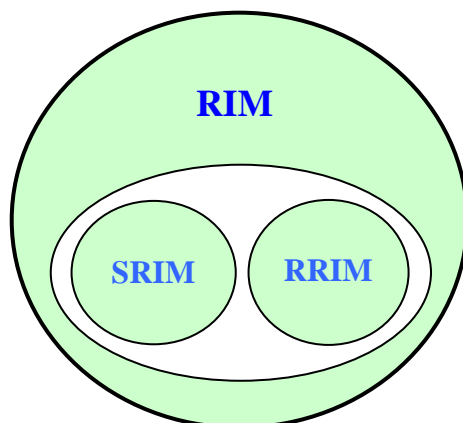


Figura 2.9 – Variantes do processo de moldação RIM.

Tabela 2.1 – Características das Variantes do processo de moldação RIM.

<i>RIM</i>	Compreende a dosagem, mistura e injeção de dois ou mais componentes a baixa pressão, sem se utilizarem cargas e reforços.
<i>RRIM</i>	Consiste na mistura de cargas de reforço ou fibras nos reservatórios de um ou de vários componentes. A pequena dimensão (0.4 a 1.5 mm) destes reforços permite que sejam bombeados e injectados para o interior da cavidade do molde produzido para o efeito. As cargas de utilização mais usuais são os minerais, em particular as fibras de vidro: fibras moídas ou em flocos.
<i>SRIM</i>	As fibras são colocadas em manta ou tecido no interior do molde, sendo posteriormente feita a injeção da resina. Este processo é bastante semelhante ao de moldação por transferência (RTM - <i>resin transfer moulding</i>), muito utilizado na produção de componentes em compósitos para a indústria aeronáutica. A grande diferença entre estes dois processos está nos menores consumos energéticos, menores pressões envolvidas e na mais elevada reactividade dos componentes poliméricos utilizados.

A utilização de uma elevada quantidade de fibras em tecido, no processo SRIM, traduz-se numa importante vantagem no que respeita à possibilidade de se obter boas propriedades mecânicas. Mas, por outro lado, é mais difícil obter bons acabamentos superficiais do componente processado. Este problema pode ser minimizado através da colocação selectiva de fibras nas zonas mais críticas, permitindo otimizar o desempenho, a forma e a qualidade final do componente processado. Também, no processo SRIM, é importante garantir um bom enchimento do molde. Consequentemente, a resina deve impregnar rapidamente o tecido, antes que o processo de cura tenha lugar. Uma má impregnação do tecido pode ter como consequência o aparecimento de zonas com menor resistência mecânica.

Na figura 2.10, pode-se observar exemplos de tecidos de fibras utilizadas nos processos de moldação por SRIM.

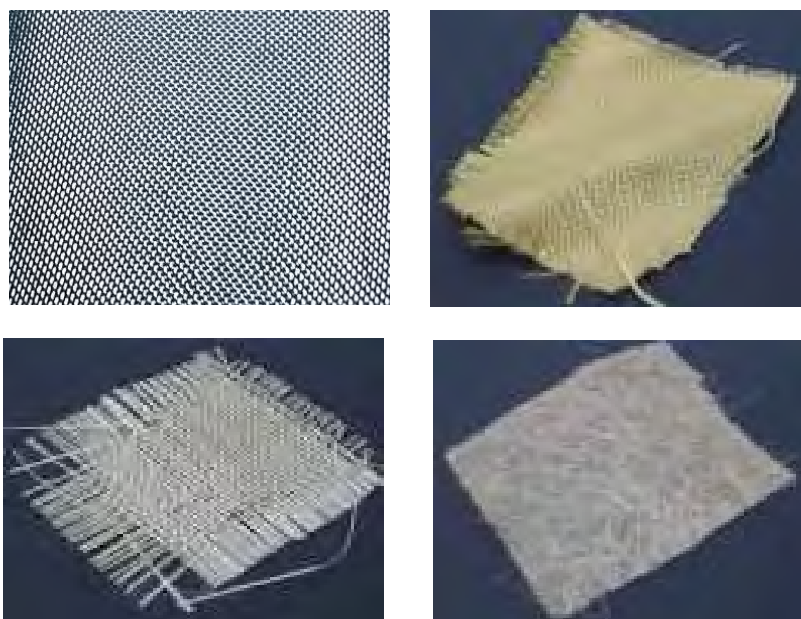


Figura 2.10 – Fibras utilizadas nos processos de moldação por SRIM: fibras de carbono, kevlar, vidro em tecido e em manta.

Áreas de aplicação de poliuretanos

As características do processo RIM (e respectivas variantes), assim como a possibilidade de se utilizar uma gama significativa de materiais, na moldação por reacção a baixa pressão, tornam o processo bastante importante para aplicações em sectores industriais tão variados quanto o automóvel, aeronáutica, construção civil, indústria de mobiliário e, mais recentemente, a área da medicina. Esta tecnologia é particularmente importante para a produção de componentes em plástico, reforçado ou não, de pequena ou grande dimensão.

Esta tecnologia, integrada com os processos convencionais de processamento de termoplásticos, pode representar uma mais valia para a indústria, consequência da simplicidade do processo, tempos reduzidos e baixos custos associados à produção dos moldes. Deste modo, o processamento por reacção (RIM) a baixa pressão representa uma tecnologia importante a considerar na produção de pequenas séries de protótipos funcionais.

Uma das técnicas mais utilizadas pelo sector dos moldes para obtenção de pequenas séries de protótipos é o vazamento em vácuo de resinas em moldes de silicone. Esta técnica permite a obtenção de componentes de elevada complexidade e baixos tempos de produção. No entanto, o tamanho limitado das câmaras de vácuo actualmente disponíveis, assim como o seu custo relativamente elevado, fazem com que a aplicação da tecnologia de vazamento em moldes de silicone nem sempre seja possível de se utilizar, nomeadamente quando se trata de produzir protótipos de grandes dimensões. A este nível, a tecnologia RIM e suas variantes é claramente vantajosa, permitindo a produção de protótipos de grandes dimensões com ciclos de enchimentos rápidos e elevada produtividade, como consequência da elevada reactividade dos materiais utilizados.

A utilização dos poliuretanos na indústria do mobiliário tem vindo a crescer de forma sustentada e irreversível. Esta indústria tem vindo a enfrentar desafios na

reestruturação, no seu modelo de produção, incorporando inovações tecnológicas, que passam pela utilização de novos materiais, poliuretanos e materiais compósitos, e novos processos de fabrico, de forma a tornar sustentáveis empresas da área do mobiliário, num mundo cada vez mais competitivo.

Os revestimentos em poliuretanos são também utilizados para revestir pavimentos de forma a torná-los mais resistentes, mais atractivos e, por outro lado, tornar estas superfícies mais fáceis de limpar. São também utilizados poliuretanos no revestimento de materiais, nomeadamente, estruturas em aço e outros materiais, de forma a criar uma barreira contra a corrosão.

As espumas de poliuretanos são materiais com propriedades ideais para diversas aplicações no sector automóvel, nomeadamente bancos, tectos, forras, etc, pelo facto de absorverem a energia de deformação (e capacidade de recuperação dessa mesma deformação) e absorver ruído.

A utilização de espumas de poliuretanos nos automóveis contribui, também, para uma diminuição da poluição do meio ambiente (CO₂), na medida em que contribui para a diminuição do peso do veículo, diminuindo a emissão de gases para a atmosfera.

Os materiais de poliuretanos são ainda utilizados na área da construção civil, no que respeita ao isolamento térmico e acústico. Estes materiais, utilizados no isolamento, tornam-se amigos do ambiente, uma vez que diminui a quantidade de combustível necessário para o aquecimento ou arrefecimento de habitações.

Outro grande campo de aplicação de materiais de poliuretano está relacionado com acessórios para a medicina, nomeadamente, cateteres e tabuladuras em geral, roupa de camas de hospital, cortinas para cirurgia, pensos rápidos, etc. As principais características que os poliuretanos possuem e que são importantes em

aplicações biomédicas são: o custo, a longevidade, a dureza e elevado quociente entre a tensão e a deformação.

Este tipo de material é também usado em ortopedia, no fabrico de produtos com características viscoelásticas, como por exemplo colchões e almofadas para evitar úlceras de pressão.

A atractividade dos poliuretanos nesta área deve-se também às suas excelentes propriedades mecânicas e de fácil processamento. Os poliuretanos exibem uma elevada resistência à tracção e boa resistência à abrasão.

Classificação dos poliuretanos

A estrutura dos poliuretanos pode variar desde polímeros lineares e flexíveis até polímeros de estrutura ramificada e rígida. Esta pode apresentar-se sob a forma de espumas rígidas ou flexíveis. Existem ainda poliuretanos destinados a aplicações médicas como biomateriais. O *Castor Oil* é obtido a partir de um óleo das sementes de uma planta brasileira designada por *Ricinus Communis* (figura 2.11). A obtenção de espumas de poliuretano é semelhante à produção de um poliuretano normal, envolvendo, contudo, duas reacções distintas. A primeira reacção é a de polimerização entre o polioli e o isocianato, sendo a segunda, uma reacção de formação da estrutura celular, envolvendo a libertação de dióxido de carbono e a vaporização de um agente expensor. Durante a formação de espumas de poliuretano, ocorrem várias transformações químicas que variam com o tempo e com a cinética da reacção.



Figura 2.11 – Planta brasileira *Ricinus Communis*

As espumas flexíveis possuem células abertas, permeáveis ao ar e apresentam grande flexibilidade de deformação. Estas espumas foram fabricadas pela primeira vez no início dos anos 1950 utilizando polióis poliéster.

No final dos anos 1950, surgiram as primeiras espumas utilizando poliálcool poliéster com catalisadores à base de estanho, aminas terciárias e silicões especiais como estabilizadores. Actualmente, mais de noventa por cento das espumas flexíveis são fabricadas com poliálcool poliéster, devido à sua resiliência e durabilidade. As espumas flexíveis classificam-se ainda em espumas de alta e baixa densidade. As espumas flexíveis de baixa densidade têm um baixo grau de reticulação e a estrutura celular aberta permite que o ar circule pela estrutura do material de forma fácil, sem que as células deixem de comunicar entre si. As espumas flexíveis de elevada densidade apresentam um elevado grau de reticulação e uma estrutura celular fechada, não existindo comunicação entre as células. Estas espumas apresentam uma boa resistência mecânica em relação ao peso e são excelentes isoladores térmicos.

As espumas rígidas caracterizam-se pela presença de elevado número de entrelaçamentos das cadeias e pela presença de células com estrutura fechada.

Não existem regras para se obterem produtos em poliuretano com boas propriedades. O sucesso de uma selecção de uma boa formulação é função de

uma adequada escolha de parâmetros de processamento, complexidade da peça e projecto do molde [12].

Os poliuretanos podem ser produzidos dentro de uma vasta gama, com densidades desde dos 6 Kg/m³ até 1220 Kg/m³, variando a sua dureza desde elastómeros muito flexíveis até rígidos e plásticos duros [13].

A elevada utilização de poliuretanos sob a forma de camadas, adesivas, selantes e elastómeros permite não só o avanço de métodos industriais tradicionais, como também amplia o campo de aplicações de polímeros [14].

No entanto, existem dois grandes factores que inibem a aplicação dos poliuretanos: a limitada estabilidade a temperaturas superiores a 90°C e a elevada inflamabilidade, principalmente nas espumas. Actualmente, através da utilização de aditivos, consegue-se obter componentes com características de resistência ao fogo, permitindo a sua utilização na construção civil.

Geralmente, os poliuretanos oferecem propriedades vantajosas ao nível do desempenho, facilidade de processamento, resistência às condições atmosféricas, boa resistência a óleos, solventes orgânicos, ácidos e alcalinos, e são também resistentes à oxidação [15].

Na figura 2.12, pode-se analisar a classificação das espumas tendo em conta a sua densidade e dureza.

As espumas de poliuretanos, como já referido, podem ser classificadas como espumas flexíveis, rígidas ou de pele integral. Para cada aplicação são necessários estabilizadores específicos. As espumas são formadas através da libertação de gás durante a reacção de polimerização dos poliuretanos. O fabrico destas espumas pode ser em descontínuo, contínuo, em placas ou em artigos moldados [13].

As espumas flexíveis são facilmente produzidas, podendo assumir uma variedade de formas, quer seja no corte de placas, quer seja em peças moldadas [13]. São muito utilizadas no sector do mobiliário e no mercado automóvel, devido ao seu conforto, sendo também muito utilizadas no fabrico de colchões, almofadas, etc.

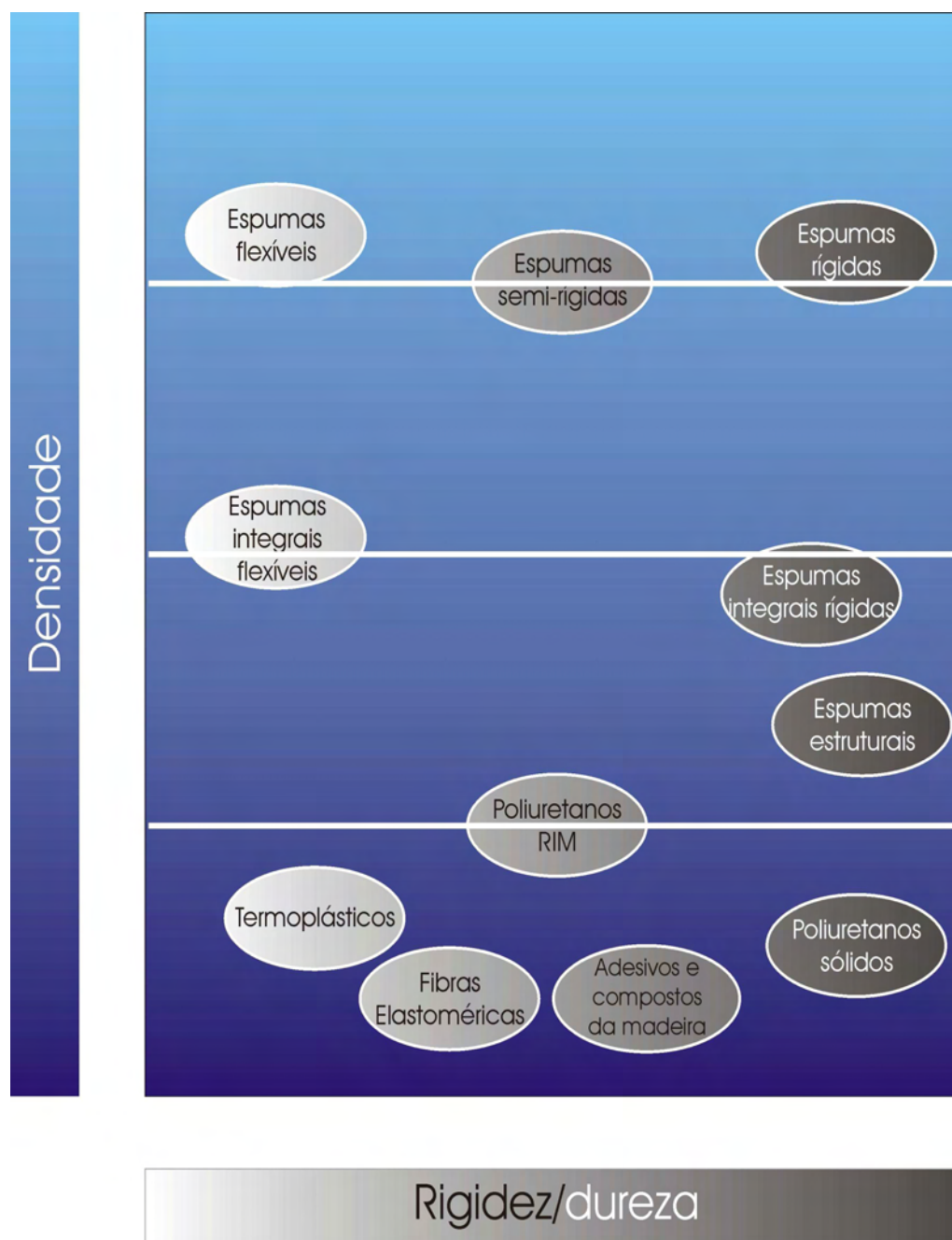


Figura 2.12 – Classificação das espumas

Quando se produzem placas em espuma flexível, a reacção exotérmica que ocorre entre o poliál e o isocianato pode provocar descoloração ou até mesmo queimar o interior da espuma. Este fenómeno é muito comum nas espumas flexíveis, devido ao tamanho que pretendemos das células.

As espumas flexíveis podem ter densidade alargada, variando entre espumas de baixa densidade e caracterizam-se pelo baixo número de ramificações e pela presença de células abertas que permitem que o ar flua mais facilmente [13].

As espumas rígidas possuem uma densidade que varia entre 30-80 kg/m³ e caracterizam-se pela presença de um elevado número de ramificações das cadeias e pela presença de células com estrutura fechada, ou seja, cada célula possui paredes que impossibilitam a passagem de ar. Estes materiais oferecem uma boa relação entre a força estrutural e o seu peso, resultando em excelentes propriedades de isolamento térmico [13].

Assim sendo, as espumas de poliuretano rígidas são usadas como isolamento para edifícios, aquecedores de água, transporte de congelados e refrigeração comercial e residencial.

Relativamente às espumas de alta densidade, estas possuem valores de densidade superiores a 100 kg/m³. Esta gama de densidades inclui moldações em espumas de pele integrada (*self skinning*) e elastómeros microcelulares. As espumas de pele integrada são usadas para fazer partes moldadas com núcleo celular e uma parede relativamente densa, e também em artigos para decoração [13].

2.2.2 Processo de cura

A cura dos poliuretanos envolve formação de cadeias tridimensionais a partir de reacções que ocorrem entre grupos polifuncionais. O processo de cura inicia-se com a formação e crescimento linear da cadeia, originando um aumento do peso

molecular. Este fenómeno resulta numa solidificação do material, havendo um aumento drástico da dureza e outras propriedades físicas e químicas.

O processo de cura é um processo muito complexo, uma vez que depende de vários parâmetros, nomeadamente, do tamanho da cadeia, da quantidade de catalisador e da estrutura química. Para além destes factores, a reacção de cura pode também ser afectada por alterações da humidade e restantes condições climáticas e também pelas condições do equipamento.

O grau de cura é influenciado pela reactividade do grupo funcional e do número existente de grupos funcionais de isocianato, uma vez que o calor da reacção depende do tipo de isocianato. No entanto, verifica-se que também para diferentes álcoois o calor da reacção difere.

Um aumento do grau de cura aumenta o módulo e a tensão dos polímeros, mas diminui a flexibilidade.

Quando se trabalha na moldação por injeção com reacção, é desenvolvido um perfil de temperaturas sobre a peça, o que resulta numa morfologia mais complexa e mais instável. O processo de RIM envolve reacções simultâneas de cura acompanhadas de escoamento dos reagentes e produtos. A optimização destes eventos permite a obtenção de peças com melhor qualidade.

2.2.3 Moldação de espumas flexíveis de poliuretano, pelo processo de cura a quente.

Os polióis de poliésteres cujo peso molecular seja igual a 3000 são empregues de preferência na moldação de espuma quente. O isocianato padrão é TDI 80 (toluene diisocyanate). Os polióis altamente reactivos com um peso molecular de 5000 são muitas vezes usados em combinação com TDI 65, na produção de espumas de elevada dureza [28]. O dióxido de carbono resultante da reacção

entre água e isocianato serve como agente de ventilação. O procedimento tecnológico para a produção de espumas moldadas a quente determina-se pela necessidade de introduzir calor no processo. O molde deve resistir às variações de temperatura, entre a temperatura do ambiente e 250° C sem perdas, assim como ser bom condutor térmico. Estes poderão ser feitos de placas de aço (espessura de 1,5 a 2 mm), de placas de alumínio (espessura de 4 a 6 mm), ou moldes de alumínio (espessura de 6 a 10 mm). A reduzida espessura das placas favorece a transferência do calor. A reacção da mistura necessita de calor para se desencadear.

2.2.4 Moldação de espumas flexíveis de poliuretano, pelo processo de cura a frio.

Na década de sessenta, a produção de peças moldadas e tratadas a frio obteve como resultado poliésteres fortemente reactivos. Misturas compostas de TDI e MDI (*metylene diisocyanate*) eram originalmente usadas em composições de isocianato. Durante muito tempo, o desenvolvimento de curas a frio esteve restringido à optimização da qualidade da formulação e à adaptação da reactividade dos poliésteres aos isocianatos disponíveis.

As formulações baseadas em misturas de TDI 80 com MDI permitem um processo estável no fabrico de espumas. Uma dureza mais elevada de espuma pode ser obtida com misturas baseadas em TDI 65 e MDI. Sistemas de modelação de espumas com tempos de permanência mais curtos no molde podem ser desenvolvidos. Se forem usadas misturas de isocianato com maior porção de TDI, podem ser obtidas propriedades particularmente boas de tracção. Com porções mais elevadas de MDI, é possível obter espumas com uma resistência à tracção inferior, que podem criar inconvenientes na manipulação subsequente. O limite prático das possibilidades de mistura é definido pela estabilidade de armazenamento do produto resultante. O aumento da porção de polímeros reduz a sensibilidade às baixas temperaturas (4,4' MDI : 40°C), assim

como a tendência para formar um sedimento pela dimerização. O esforço para abrir uma célula e a reactividade das espumas com base em MDI podem ser influenciados pela porção de monómero, pela relação dos isómeros e outras modificações. Estes isocianatos são mais débeis na reactividade do que as misturas ou modificações de TDI. Entretanto as espumas de base MDI demonstram normalmente uma relação de dureza/densidade muito favorável.

Os sistemas de cura a frio reagem sem aquecimento adicional, de modo que na produção são possíveis tempos de permanência no molde comparativamente curtos. Para realizar uma óptima superfície moldada, os moldes são mantidos a uma temperatura na ordem de 30 a 65° C, ou num forno a temperatura constante, ou por aquecimento directo, que é óptimo, como agente lubrificante para o material do molde no sistema de espuma. A temperatura do molde requerida também depende igualmente do material dos moldes. Os moldes de metal requerem temperaturas mais elevadas que os moldes de resina. Deveriam ser construídos moldes de tratamento a frio para resistir a pressões de cerca de 1 a 2 bar.

Processo de cura – Modelos numéricos

Os poliuretanos (PU's) são, como já referido, materiais poliméricos formados pela reacção entre di- ou poli-isocianatos e dióis ou polióis. Representam uma classe única de materiais com uma vasta gama de aplicações, tais como espumas, revestimentos, adesivos e elastómeros.

A reacção de cura destes materiais poliméricos envolve a formação de uma rede tridimensional por reacção entre grupos polifuncionais [16,17]. O processo de cura dos poliuretanos tem início com a formação e crescimento linear da cadeia polimérica. Estas cadeias ramificam-se rapidamente e formam-se ligações cruzadas. O peso molecular vai aumentando de forma rápida e várias cadeias ligam-se numa rede com peso molecular infinito. Esta reacção caracteriza-se

fundamentalmente por duas ocorrências principais: a gelificação e a vitrificação [18,19].

A gelificação corresponde à formação de uma rede molecular incipiente infinita, associada a uma diminuição de fluidez e, também, diminuição de capacidade de processamento. Depois da gelificação, com o evoluir da reacção, a quantidade de material sólido aumenta naturalmente e o polímero torna-se mais ramificado, aumentando a tenacidade e a sua resistência mecânica. A vitrificação corresponde à formação de material sólido vitrificado, devido ao aumento da densidade de ligações cruzadas e do peso molecular do polímero em cura. O início da vitrificação ocorre quando o aumento de T_g (temperatura de transição vítrea), atinge a temperatura de cura (T_{cura}). A velocidade da reacção diminui substancialmente depois da vitrificação, tornando-se mais lenta à medida que a difusão domina os componentes reactivos. O efeito da difusão provoca uma desaceleração do processo de solidificação e é determinante também na percentagem final de material curado.

O processo de RIM envolve reacções simultâneas de cura acompanhadas de escoamento dos reagentes e produtos. A optimização destes eventos permite naturalmente a obtenção de peças moldadas de melhor qualidade.

A simulação numérica do processo RIM é realizada com base na aplicação de equações de transferência de calor e de escoamento de fluidos. O escoamento de fluidos é modelado através de equações de conservação de massa e de momento.

Conservação de massa

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (25)$$

Momento

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j \quad (26)$$

sendo ρ a densidade, g a aceleração da gravidade e μ a viscosidade dinâmica. As mudanças de viscosidade associadas ao processo de cura são modeladas pela maioria dos softwares de simulação, nomeadamente o MoldFlow e o Moldex, através das seguintes equações:

$$\mu = \mu_m \cdot \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha} \right)^{(C_1 + C_2 \cdot \alpha)} \quad (27)$$

sendo μ_m obtido através de

$$\mu_m = \frac{\mu_0}{1 + \left(\mu_0 \cdot \frac{\gamma}{\tau} \right)^{(1-n)}} \quad (28)$$

e

$$\mu_0 = B \cdot e^{T_b/T} \quad (29)$$

Nas equações anteriores, τ é a tensão de corte na transição entre o comportamento Newtoniano e da lei de Potência; μ_0 representa a viscosidade para uma tensão de corte igual a zero.

A transferência de calor pode ser descrita pela equação da conservação de energia que inclui um termo relativo à geração de calor, dado por um modelo cinético apropriado.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho H \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (30)$$

Onde h é a entalpia específica da resina, k é a condutividade térmica, H é o calor exotérmico libertado durante a reacção por unidade de massa, α é a conversão

(quantidade de material sólido formado) e $\partial\alpha/\partial t$ é a taxa da reacção descrita pelo modelo cinético.

Modelos cinéticos

Foram desenvolvidos diversos modelos fenomenológicos para simular a cura de materiais termoendurecíveis. Nesses modelos foi considerado apenas que só uma reacção é responsável pelo processo de cura expressa pela seguinte equação [16]:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} = K(T) \cdot f(\alpha) \quad (31)$$

onde $f(\alpha)$ é uma função da conversão (α) e $K(T)$ é a constante da taxa da reacção em função da temperatura. No caso dos poliuretanos, a reacção de cura é descrita por diversos softwares comerciais, através dos modelos de Kamal e Souror [18,21]:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} = (K_1 + K_2\alpha^m) \cdot (1-\alpha)^n \quad (32)$$

onde $K_1(T)$ e $K_2(T)$ são as constantes da taxa da reacção, m e n são constantes, representando a soma de m com n a ordem geral da reacção. A ordem da reacção indica o número de átomos, moléculas ou grupos reactivos cuja concentração estabelece a taxa da reacção. As constantes da taxa de reacção descrevem uma lei de Arrhenius [28], pelo que, podem ser descritas pelas equações seguintes:

$$K_1 = A_1 \cdot e^{-E_1/\Delta T} \quad (33)$$

$$K_2 = A_2 \cdot e^{-E_2/\Delta T} \quad (34)$$

onde A é o factor pré-exponencial da constante da taxa de conversão, E é a energia de activação, R é a constante dos gases perfeitos, ΔT é a temperatura absoluta.

Os modelos fenomenológicos referenciados anteriormente consideram que apenas uma reacção é responsável por descrever todo o processo de cura. No entanto, esses modelos não consideram os efeitos da concentração de isocianato na taxa da cura/conversão. Consequentemente, os parâmetros cinéticos têm que ser recalculados após cada mudança na concentração dos reagentes. Uma outra limitação tem a ver com o facto de ser difícil estimar o efeito das operações de pós-cura, devido aos efeitos controlados pela difusão depois da vitrificação.

Foi desenvolvido um novo modelo cinético baseado em fenómenos físicos e químicos fundamentais que controlam o comportamento de cura dos materiais termoendurecíveis no processo RIM. Este modelo termomagnético foi desenvolvido na expectativa de simular de uma forma mais correcta as alterações físicas e químicas[19].

O modelo descreve as características principais do processo de cura, nomeadamente os efeitos controlados pela difusão, reacções com cura incompleta e terminação unimolecular. Este modelo cinético pode ser ligado a modelos de previsão de contracção e termo-reológicos, por forma a descrever o escoamento e a transferência de calor no processo RIM. Representa, também, uma abordagem mais realista para todos os fenómenos que ocorrem durante as reacções de cura e é expresso pela seguinte equação [18]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{1 + \exp[\xi(\alpha - \alpha_d)]} \varphi \exp\left(\frac{-E}{R T_{abs}}\right) [Iso]^q \alpha^m (1 - \alpha)^n \quad (11) \quad (35)$$

onde ξ é a constante de difusão, α_d é o valor critico da percentagem de cura/conversão, correspondente à prevalência dos efeitos controlados pela

difusão sobre a reacção de cura, ϕ é o factor pré-exponencial da constante da taxa de cura, E é a energia de activação, R é a constante dos gases perfeitos, T_{abs} é a temperatura absoluta, p e q são constantes e os expoentes m e n representam a ordem da reacção, com a soma $(m+n)$ a representar a ordem geral da reacção e $[Iso]$ é a concentração de isocianato. Os parâmetros cinéticos, ξ , α_d , m , n e E , não são constantes. Experimentalmente constatou-se que variam de forma não linear com a temperatura e com a concentração de isocianato.

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

No desenvolvimento de produtos é importante ter em consideração todas as variáveis que influenciam os aspectos relacionados com as propriedades dos materiais, os aspectos económicos e os relacionados com o processamento e segurança.

Neste capítulo descrevem-se os vários procedimentos e técnicas experimentais utilizados na caracterização dos materiais compósitos de matriz polimérica com fibras de carbono e espumas de poliuretano.

3.2 Materiais e procedimentos experimentais

Materiais

Foi processado um conjunto de materiais compósitos de matriz epoxídica com diferentes números de camadas de fibra. As fibras utilizadas neste trabalho foram fibras longas de carbono, que se apresentaram sob a forma de tecido biaxial (figura 3.1), sendo estas fornecidas em forma de rolo.



Figura 3.1 – Tecido de fibras de carbono utilizadas no fabrico dos materiais desenvolvidos.

A matriz polimérica utilizada foi uma resina termoendurecível epoxídica, resina epoxídica 520 com endurecedor 523. Os dados foram retirados das fichas do produto fornecidas pelo fabricante.

As características dos materiais utilizados no fabrico das placas em material compósito, resina epoxídica reforçada com fibra de carbono, estão indicadas nas seguintes tabelas (tabela 3.1 e 3.2).

Tabela 3.1 – Principais características do tecido de fibras de carbono usado.

Característica	Valor
Tipo de tecido	Biaxial [0°/90°]
Material	Carbono
Módulo de Young [GPa]	230
Referência	195-1000
Gramagem [g/m ²]	196

Tabela 3.2 – Principais características da resina epoxídica 520 e endurecedor 523.

Característica	Resina	Endurecedor
Aspecto	Líquido	Líquido
Cor	Transparente	Amarelo
Massa volúmica [g/cm ³]	1.16	1
Rácio de mistura	1	1/3
Ciclo de cura e de pós-cura	8 H a 20°C	

Técnica de processamento de compósitos de matriz epoxídica com fibras de carbono

Na literatura, conforme já referido no capítulo 2, apresentam-se inúmeras formas de processamento [5], desde técnicas manuais, como é o caso da *hand lay-up* (moldação manual), passando por técnicas automatizadas, como é o caso da moldação por compressão e injeção.

Foram processadas placas de material compósito de matriz epoxídica com doze camadas de fibra de carbono em saco de vácuo (figura 3.2), com o objectivo de caracterizar as suas propriedades mecânicas.



Figura 3.2 – Procedimento utilizado no fabrico de placas em material compósito de matriz epoxídica com fibras de carbono

Neste processo, as camadas de tecido de fibra de carbono foram colocadas manualmente sobre a superfície moldante, permitindo orientar as fibras (0-90 °).

Para se obter uma boa desmoldação do componente moldado, é necessário aplicar uma película desmoldante que promova a separação entre o componente e o molde.

No fabrico das placas aplicou-se alternadamente o tecido de fibra de carbono com resina, procurando garantir a impregnação completa das fibras de carbono. De

forma a garantir a necessária proporção de resina, esta foi pesada previamente. A deposição da resina foi realizada manualmente com recurso a uma trincha, de modo a distribuir esta por toda a superfície do tecido de fibra de carbono. Esta deposição deve ser realizada com cuidado, de forma a evitar zonas mal impregnadas.

O tecido de arrancamento é colocado no topo das várias camadas impregnadas. Este tecido é geralmente um pano de fibra de vidro, poroso e revestido por um material desmoldante, de forma a ser facilmente removido da superfície do compósito. Por cima do tecido de arrancamento, é colocada uma película plástica, para que o excesso de resina seja retirado durante a aplicação de vácuo ao compósito. Em seguida, é colocada uma manta de material poroso, de forma a facilitar a distribuição uniforme do vácuo.

Por último, é colocado o saco de vácuo, que é normalmente de nylon ou um elastómero de silicone. Este tem como função criar uma atmosfera de vácuo controlada e isolada durante o processo de cura.

Na figura 3.3, pode observar-se uma representação esquemática do processo de fabrico manual de um material compósito com fibras longas.

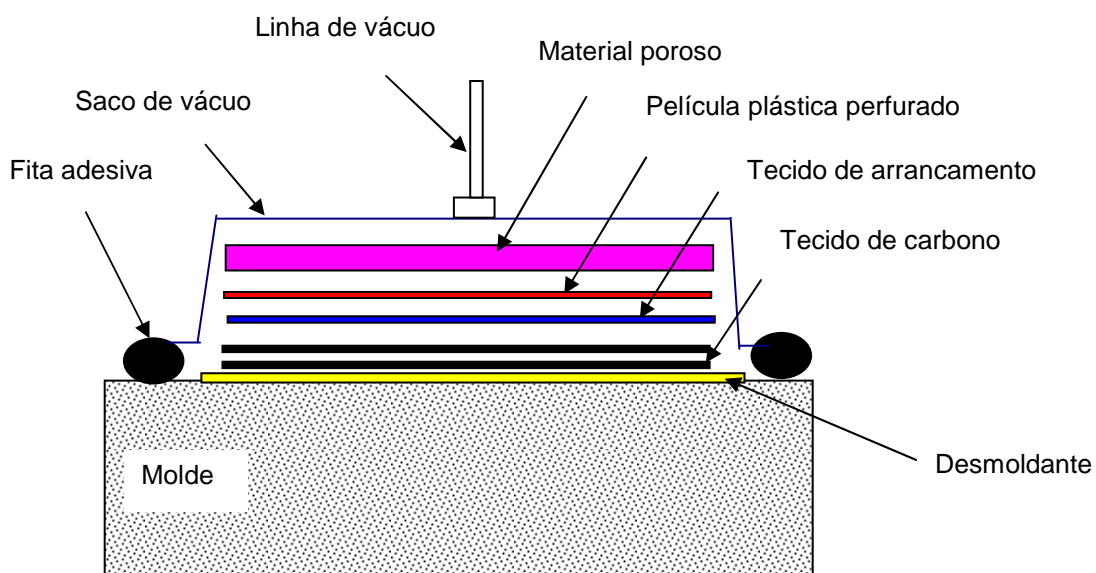


Figura 3.3 – Representação esquemática do processo de fabrico manual de componentes em compósitos de matriz epoxídica com fibras de carbono

Ensaio estático de tracção

Neste subcapítulo englobam-se os ensaios de tracção uniaxial e com o uso de extensometria. Com os ensaios de tracção uniaxial foi objectivo determinar a resistência mecânica e o módulo de elasticidade dos compósitos com fibras.

Para determinar o coeficiente de *Poisson*, foi utilizada a técnica de extensometria, tendo-se, para o efeito, instrumentado provetes.

Os extensómetros eléctricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em resistência eléctrica equivalente [23]. A medição é realizada fixando um extensómetro na estrutura, convertendo a deformação causada numa quantidade eléctrica (voltagem). As características das medidas com extensómetros são resumidas abaixo:

- Alta precisão de medição;
- Pequeno tamanho e baixo peso;
- Excelentes respostas aos fenómenos dinâmicos;
- Fácil utilização;
- Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla gama de temperaturas;
- Aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo, desde que utilizado tratamento apropriado;
- Usados como elementos transdutores para medir várias quantidades físicas (força, pressão, aceleração, deslocamento);
- Possibilita a medida em locais remotos.

Os extensómetros têm por base o fenómeno de que os metais mudam a sua resistência eléctrica quando sofrem uma deformação. Circuitos eléctricos

especiais são empregados para medidas de deformação em extensómetros montados em estruturas. O circuito é geralmente chamado de ponte de *Wheatstone*. Este é o circuito mais frequentemente usado e o que apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência. Para aprofundar mais os conhecimentos sobre os princípios do circuito de medição deve-se consultar a referência [24]. Existem vários tipos de extensómetros disponíveis, em função do tipo de aplicação. Estes podem ser classificados segundo:

- Material resistivo (fios resistivos, lâmina, semicondutor e semicondutor por difusão);
- Material base (papel, poliéster, poliamida, outros);
- Configuração (uniaxiais, biaxiais, múltiplos (roseta), e outras).

Os extensómetros de lâmina são os mais comuns, sendo produzidos colando as lâminas de alguns micrómetros de espessura, usualmente ligas de cobre e níquel, em bases plásticas e onde são gravadas as configurações desejadas [24]. Os extensómetros de fios resistivos são compostos por um fio fino resistivo com diâmetro entre 13 e 25 μm , colados em base de papel ou plástico em forma de grade [24].

Quando um provete é sujeito à tracção, o coeficiente de *Poisson* é dado pela razão entre a extensão lateral e a extensão longitudinal:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{longitudinal}} \quad (36)$$

A constante G designa-se módulo de elasticidade transversal ou módulo de distorção. Pode escrever-se em função do módulo (E) e do coeficiente de *Poisson* (ν) através de:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (37)$$

Em virtude da isotropia do material, $E_x = E_y$, apenas se define um único coeficiente de *Poisson* (equação 36) e um único módulo de elasticidade transversal (equação 37).

Para os ensaios estáticos de caracterização mecânica e para a determinação do coeficiente de Poisson (técnica de extensometria), foi utilizada uma máquina servo mecânica Shimadzu Autograph (figura 3.4). Esta máquina possui uma consola de controlo e acoplamento a um computador, permitindo, através de um software específico (Trapezium 2), o controlo e tratamento de todos os parâmetros (carga, velocidade, deslocamento, etc.). A mesma permite também a visualização da evolução da curva carga–deslocamento ao longo do ensaio, bem como o tratamento e armazenamento de resultados. Foi utilizado um extensómetro axial (Instron, CAT No 2630-038, travel 25 mm, Gauge 50 mm) para efectuar a medição da extensão (figura 3.4).



(a)



(b)

Figura 3.4 – (a) Máquina usada nos ensaios de tracção; (b) Extensómetro usado nos ensaios de tracção.

A partir das placas processadas com diferentes números de camadas, foram maquinados provetes com a geometria indicada na figura 3.5. Os provetes foram maquinados através de uma máquina CNC (*Computer Numerical Control*) e, posteriormente, foram fixadas duas chapas de alumínio em cada uma das “línguas”, de forma a existir uma transmissão correcta das forças das amarras da máquina de tracção ao provete.

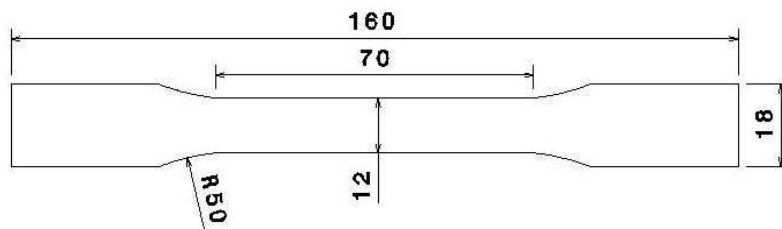


Figura 3.5 – Geometria dos provetes de tracção (dimensões em mm).

Na figura 3.6, pode-se observar o pormenor de montagem do provete nas amarras da máquina de ensaios de tracção.



Figura 3.6 – Montagem utilizada na tracção dos provetes.

Na figura 3.7, pode-se observar um provete em tracção instrumentado, com extensómetros a 0° (longitudinal) e a 90° (transversal), para avaliar as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*).



Figura 3.7 – Provete instrumentado (extensómetros GFLA-3-50)

Ensaaios de impacto

O objectivo destes ensaios consistiu em determinar a energia absorvida, entre outros parâmetros, pelos diferentes materiais compósitos com diferente número de camadas de fibra de carbono.

Para a realização destes ensaios, foi utilizada uma máquina de ensaios de impacto IMATEK IM-30, como se ilustra na Figura 3.8. Esta máquina apresenta as seguintes características: velocidade de impacto máxima de 7.67 m/s a uma altura de queda de 3 m; a massa do impactor pode variar de 2 a 100 kg, permitindo energias de 4 a 882 J; a aquisição de dados máxima é de 1 250 000 dados por segundo.

O software de tratamento de dados (*ImpAcqt control and analysis*) permite manipular dados do ensaio tais como a energia, velocidade, deslocamento e força, assim como o controlo de todo o ensaio. Neste trabalho foram realizados testes de impacto em estruturas apoiadas. Consequentemente, os provetes tinham uma dimensão mínima de 50 mm de diâmetro, sendo que a zona testada tinha apenas 40 mm de diâmetro interior e os restantes permitiam o apoio na estrutura (figura 3.9 e 3.10). As espessuras das amostras encontram-se na tabela 3.3.



Figura 3.8 – Máquina de ensaios de impacto IMATEK IM30.

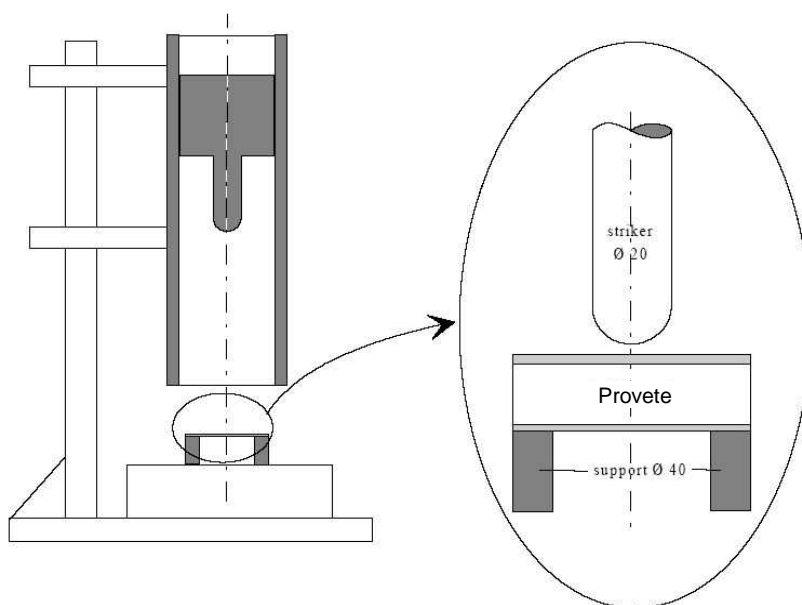


Figura 3.9 – Configuração do ensaio segundo a norma ISO 6633

Na figura 3.10, pode-se observar que o suporte é cilíndrico, com um diâmetro interior de 40 mm, e o impactor tem a cabeça hemisférica, com diâmetro de 20 mm. No ensaio, o provete é apertado contra o suporte (figura 3.10).

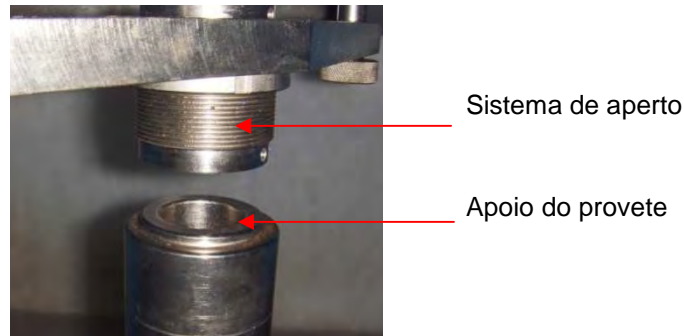


Figura 3.10 – Local de apoio do provete.

Os testes foram todos realizados tendo em consideração as especificações do equipamento e a norma ISO 6633, com um carro de massa de 2.2 Kg (M_{carro}) e um impactor de 0.345 Kg ($M_{impactor}$) para várias alturas (h).

A energia de impacto é dada pela relação

$$E_{impacto} = (M_{carro} + M_{impactor})gh. \quad (38)$$

Determinação de densidades

Com estes ensaios, pretendeu-se determinar experimentalmente as densidades dos materiais processados. No cálculo das densidades dos materiais foi utilizada uma balança electrónica de precisão (figura 3.11) equipada com uma balança que permite determinar as densidades. Não foi necessário ter um provete específico, bastando para tal uma pequena amostra do material.

Na determinação das densidades foi utilizado o procedimento com base no princípio de Arquimedes: determinação da massa do material (m_c); determinação

da massa aparente (m_a); cálculo da temperatura da água (T_{H_2O}); cálculo da densidade da amostra pela fórmula

$$\rho = \left(\frac{m_c}{m_c - m_a} \right) \rho_{H_2O} \quad (39)$$

Para a ρ_{H_2O} deve-se ter em conta a temperatura da água medida no ponto 3.



Figura 3.11 – Balança electrónica de precisão usada na determinação das densidades.

DMA (Dynamic Mechanical Analysis)

O equipamento de análise DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*) permite avaliar o comportamento mecânico de um material quando sujeito a um programa de temperatura controlada e sob o efeito de uma força mecânica que se altera com o tempo (figura 3.12).

Com este tipo de equipamento é possível, para além de obter o módulo de elasticidade, determinar a temperatura de transição vítrea (T_g). A temperatura de transição vítrea é uma propriedade do material onde se pode obter a temperatura da passagem do estado vítreo para um estado “maleável”. A transição vítrea é um parâmetro importante nas áreas de processamento, pesquisa e desenvolvimento de materiais, devido à grande importância com relação às mudanças das

propriedades, podendo-se estudar o comportamento deles em função da temperatura.

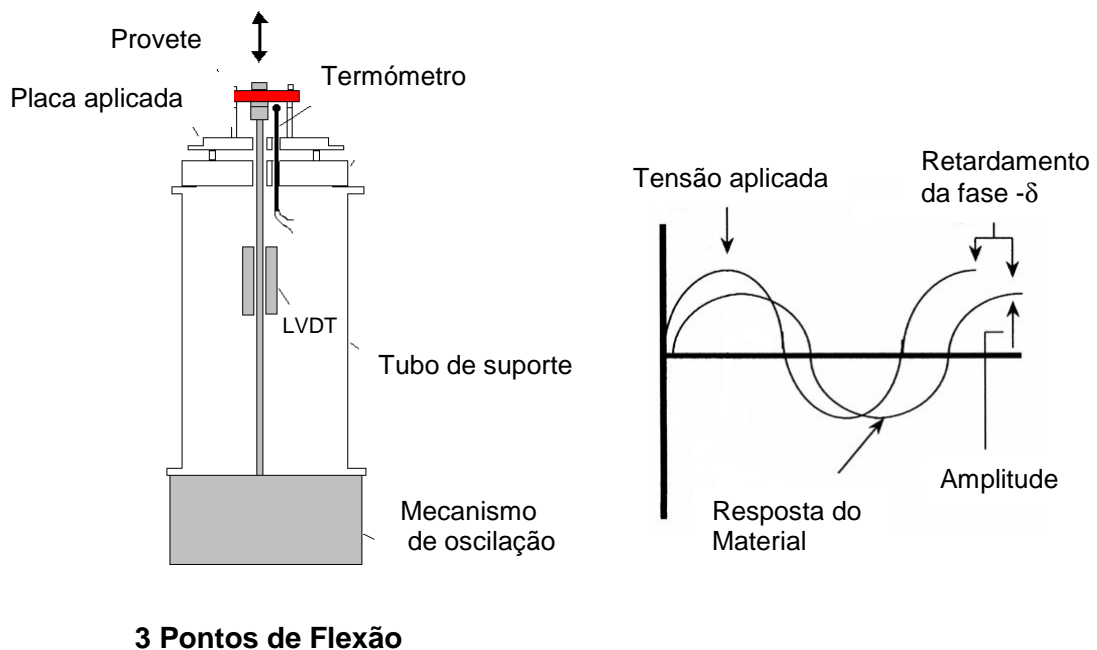
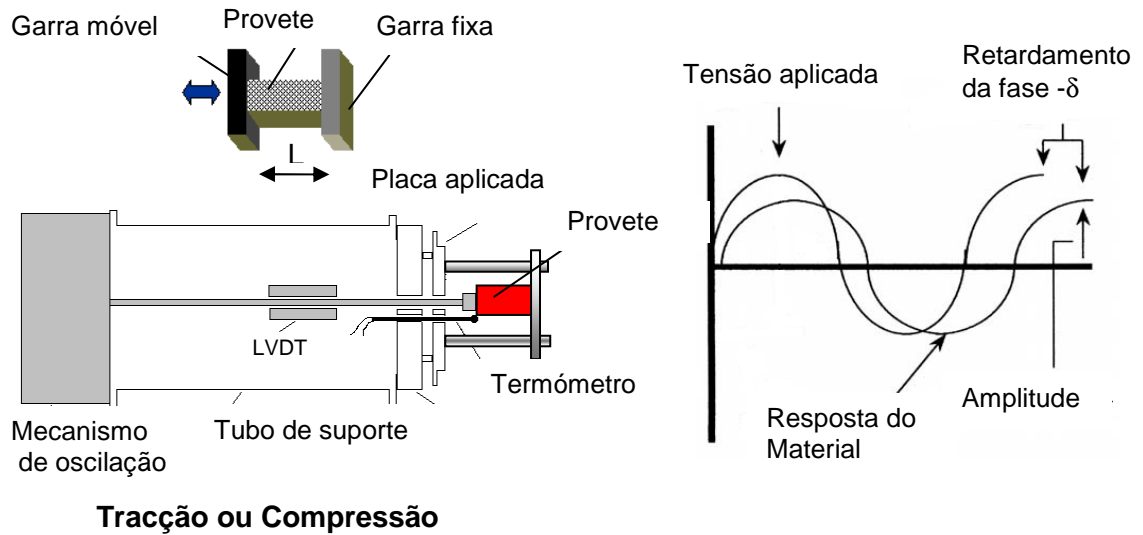


Figura 3.12 – Esquema do equipamento Tritec 2000 e funcionamento

Geralmente, uma análise de DMA é função do modo de operação, como se pode verificar pelas figuras 3.12 e 3.13.

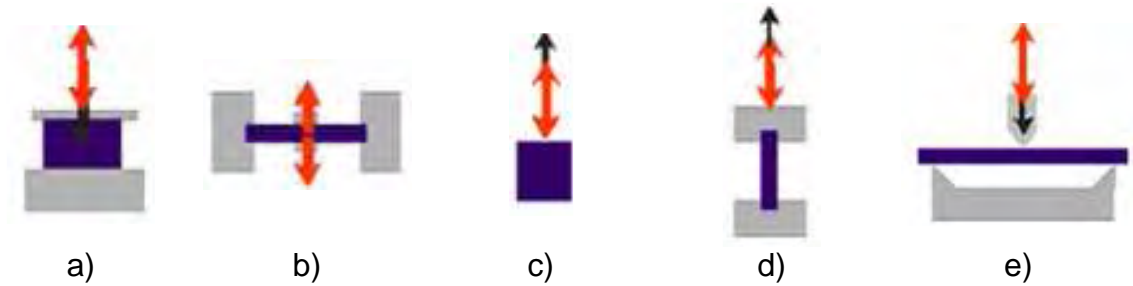


Figura 3.13 – Modos de operação de um equipamento DMA **a)** compressão/penetração; **b)** fadiga; **c)** oscilação com carga estática; **d)** tracção; **e)** flexão em três pontos.

Os ensaios dos materiais compósitos com fibra de carbono foram realizados em flexão em 3 pontos, com variação de temperaturas entre os 20°C e os 120°C, tendo como base a norma alemã DIN53457.

Os provetes de material composto foram ensaiados com dimensões de 42 mm de comprimento, 4 mm de largura e altura variável de amostra para amostra (tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Espessuras dos compósitos com diferentes números de camadas de carbono.

Nº Camadas	Espessura [mm]
1	0,48
2	0,64
3	0,88
4	1,06
5	1,33
6	1,55
7	1,72
8	1,91
9	2,23
10	2,35
11	2,65
12	2,8

Após a montagem do provete de material compósito no equipamento de DMA, previamente preparado com o sistema para flexão em 3 pontos, programou-se o equipamento para realizar o ensaio com uma gama de temperaturas entre 20 e 120°C. O software que acompanha o equipamento de DMA regista todos os valores necessários para a análise.

Foram também realizados ensaios de DMA com as espumas de poliuretano (em modo de tracção, figura 3.14), de forma a avaliar o efeito da temperatura de processamento das espumas, da temperatura de cura e da concentração de isocianato. As amostras foram processadas com diferentes percentagens, 25, 35, 40, 50, 60, e 75% em massa de isocianato e temperaturas de cura de 30, 50, 75 e 100° C. Durante os ensaios, foi imposta uma variação da temperatura numa gama entre 30 e 100°C, com uma taxa de aquecimento de 5°C/minuto. As amostras foram processadas com recurso a um molde em alumínio produzido para o efeito.



Figura 3.14 – Equipamento DMA usado nos ensaios de caracterização das espumas de poliuretano [21]

Técnicas de caracterização aplicadas ao poliuretano

Para estabelecer as relações entre as propriedades mecânicas e as condições de processamento, foram efectuados dois ensaios experimentais diferentes: os ensaios de estudo de DSC e DMA [26-27]. O isocianato (Suprasec 2552 de

Huntsman) usado nestes testes é baseado no MDI, e o poliol era um poliéster (Daltoflex ES 15861 de Huntsman). A reacção destes dois reagentes permite a produção de espuma viscoelástica.

Aquisição de dados calorimétricos

O calorímetro permite a quantificação da energia envolvida nas reacções. É uma técnica em que a diferença de temperatura de uma substância e de um material de referência é medida em função da temperatura, enquanto a substância reage e o material de referência é submetido a uma programação de temperatura controlada (figura 3.15).

Existem dois tipos de equipamentos que realizam a calorimetria diferencial de varredura: o primeiro é denominado de DSC de compensação de energia e o segundo de DSC de fluxo de calor.

O equipamento inicialmente desenvolvido e que dá nome à técnica é chamado de DSC por “compensação de energia”, desenvolvido por Perkin-Elmer Co. (1964).

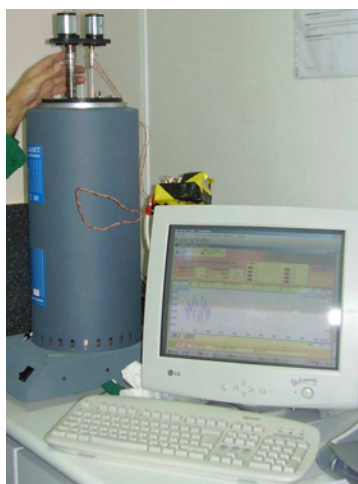


Figura 3.15 – Calorímetro de mistura e reacção (C80 da Setaram).

Para uma aquisição de dados que permitisse a observação da progressão e extensão da cura foram aplicadas duas técnicas e equipamentos distintos. Para a aquisição rigorosa do calor libertado durante a reacção, e contemplando também os instantes iniciais, foi utilizado um calorímetro especial de reacção de mistura da Setaram, o C80.

A calorimetria diferencial de varrimento é largamente utilizada na análise de sistemas termoendurecíveis activados foto ou termicamente. Esta técnica torna-se quase inútil quando as resinas reagem muito rapidamente, sem que haja necessidade de calor. De forma a eliminar este problema, um calorímetro de reacção e mistura C80 (figura 3.15) da Setaram foi utilizado para a medição do calor libertado durante o processo de polimerização. Este sistema usa o princípio calorimétrico de Calvet (figura 3.16) e representa uma poderosa técnica no campo da análise térmica.

Um forno cilíndrico contém dois orifícios cilíndricos, para reservatórios onde se colocam a célula com a amostra e a célula de referência. Estes orifícios estão rodeados por centenas (mais de 1000) de termopares. No sistema cilíndrico tradicional de Calvet (Calvet, 1948), as superfícies exteriores de cada contentor de células estão em contacto com centenas de termopares, que se encontram, por sua vez, ligados em série, entre o contentor e o forno.

Pelos fios dos termopares ocorre a condução mais importante de calor do forno para as amostras.

Os dois contentores das amostras encontram-se termicamente separados e as trocas de calor ocorrem unicamente entre o forno e os contentores. O sinal medido é a média da diferença de temperatura (ΔT) dos dois contentores e é gerado pela ligação diferencial das duas baterias de termopares (termopilhas):

$$\Delta T = \Delta T_{FS} - \Delta T_{FR} = \Delta T_{SR} \quad (40)$$

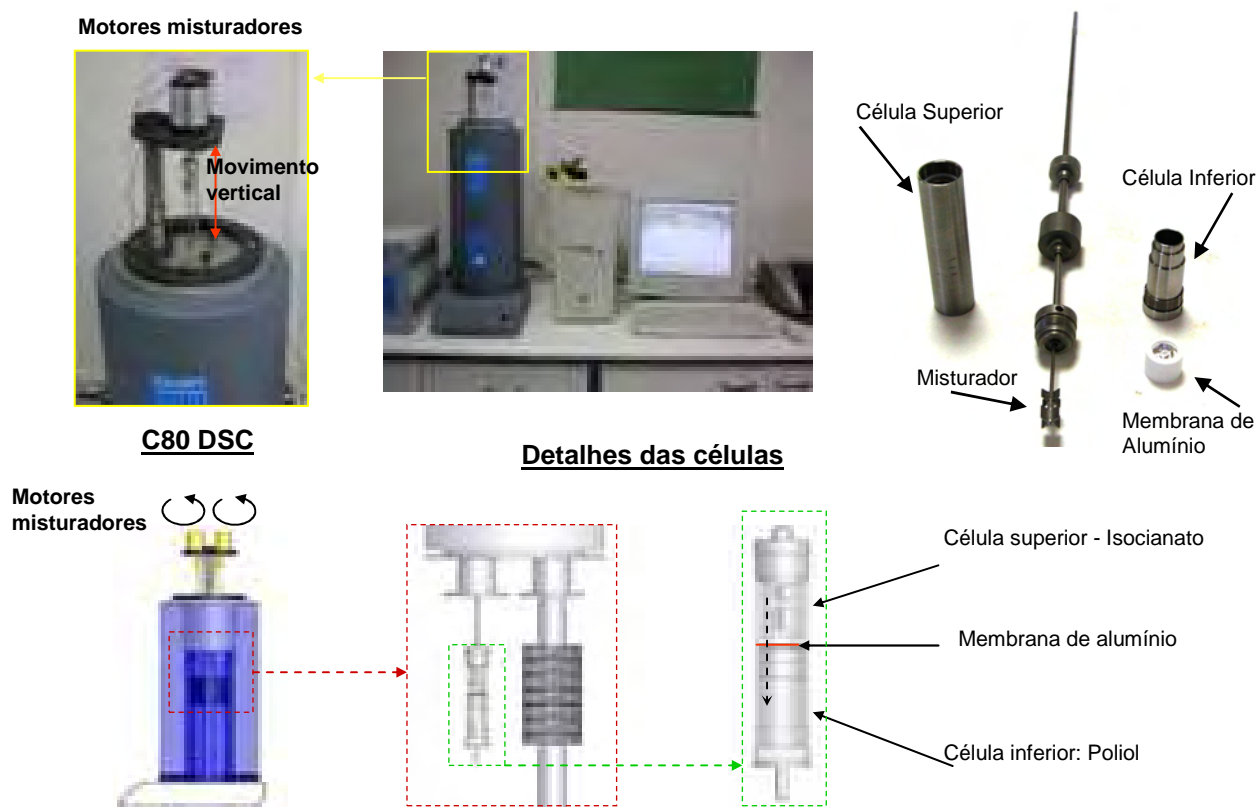


Figura 3.16 – Calorímetro C80 da Setaram com um sistema de mistura implementado.

Uma voltagem eléctrica proporcional a ΔT , ou um sinal de calor libertado gerado internamente a partir do ΔT representa o sinal de medida.

O calor medido pelo C80 é proporcional ao calor libertado e à taxa da reacção:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_{\text{Total}} \frac{d\alpha}{dt} \quad (41)$$

onde dQ/dt é o calor específico e o Q_{Total} é o calor total libertado, correspondendo à soma do calor libertado numa análise isotérmica e do calor residual libertado através de uma análise dinâmica. O valor de Q_{Total} pode ser obtido através da integração do pico obtido no DSC.

$$Q_{\text{Total}} = \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt \quad (42)$$

onde t é o tempo para a cura completa. A fracção convertida pode ser obtida na seguinte forma:

$$\alpha = \frac{1}{Q_{\text{Total}}} \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt \quad (43)$$

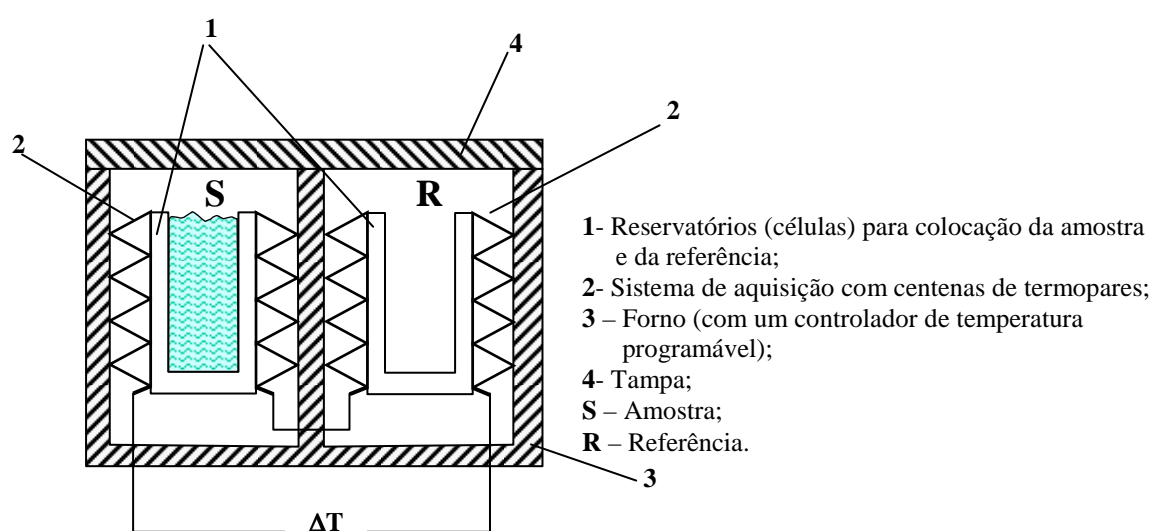


Figura 3.17 – DSC com um sistema de aquisição em cilindro (Calvet, 1948; thermally decoupled Sample Containers; according to Hemminger 1994) [30]

Neste trabalho de investigação, para estudar a reacção de cura dos sistemas PU com diferentes concentrações de isocianato e diferentes temperaturas de cura, foram efectuadas polimerizações isotérmicas, recorrendo a amostras (tabela 3.4) que continham 25, 35, 40, 50, 60, e 75% em massa de isocianato e temperaturas de cura de 30, 50, 75 e 100°C. O conhecimento do comportamento cinético da cura dos sistemas de espuma viscoelástica de PU é exigido para estabelecer as estratégias de cura e processamento apropriadas para assegurar a qualidade e as características exigidas dos produtos finais.

Tabela 3.4 – Plano das experiências

Plano de Experiências - C80					
Para uma temperatura de 30 °C					
	Massa Total [mg]	Massa Poly [mg]	Massa Iso [mg]	% Poly	% Iso
Exp 1	2011,8	502,8	1509	24,99%	75,01%
Exp 2	2057	801	1256	38,94%	61,06%
Exp 3	2016,9	1300	716,9	64,46%	35,54%
Exp 4	2013	1013	1000	50,32%	49,68%
Exp 5	2030	1201	829	59,16%	40,84%
Exp 6	2024	1504	520	74,31%	25,69%
Para uma temperatura de 50 °C					
	Massa Total [mg]	Massa Poly [mg]	Massa Iso [mg]	% Poly	% Iso
Exp 1A	2046	524	1522	25,61%	74,39%
Exp 2A	2042,5	827	1215,5	40,49%	59,51%
Exp 3A	2043,4	1319	724,4	64,55%	35,45%
Exp 4A	2031	1008	1023	49,63%	50,37%
Exp 5A	2009	1203	806	59,88%	40,12%
Exp 6A	2024	1502	522	74,21%	25,79%
Para uma temperatura de 75 °C					
	Massa Total [mg]	Massa Poly [mg]	Massa Iso [mg]	% Poly	% Iso
Exp 1B	2001,4	500,5	1500,9	25,01%	74,99%
Exp 2B	2031,3	812,5	1218,8	40,00%	60,00%
Exp 3B	2037,4	1313,3	724,1	64,46%	35,54%
Exp 4B	2035,4	1026,6	1008,8	50,44%	49,56%
Exp 5B	2018,6	1210,9	807,7	59,99%	40,01%
Exp 6B	2013,7	1506,1	507,6	74,79%	25,21%
Para uma temperatura de 100 °C					
	Massa Total [mg]	Massa Poly [mg]	Massa Iso [mg]	% Poly	% Iso
Exp 1C	2028,1	511,4	1516,7	25,22%	74,78%
Exp 2C	2016,9	800,8	1216,1	39,70%	60,30%
Exp 3C	2033,5	1327,3	706,2	65,27%	34,73%
Exp 4C	2026,6	1005,5	1021,1	49,62%	50,38%
Exp 5C	2052,3	1229	823,3	59,88%	40,12%
Exp 6C	2049	1518	531	74,08%	25,92%

Neste tipo de ensaio, tem de se ter muito cuidado na preparação da amostra, começando por primeiro garantir a limpeza de todos os componentes utilizados, seguindo-se a montagem dos provetes, como se ilustra na figura 3.18.

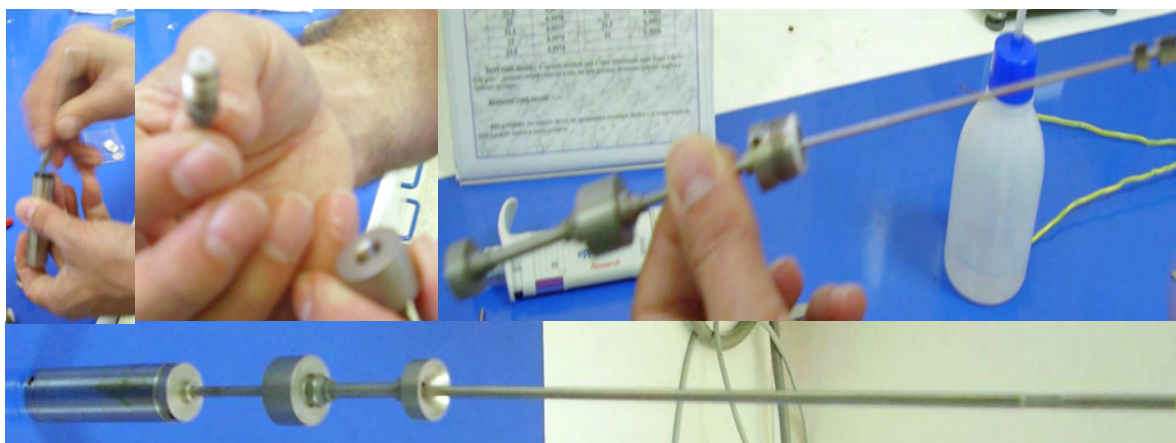


Figura 3.18 – Montagem do provete de ensaio

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Com o objectivo de optimização do produto final, cadeira de conforto, foram desenvolvidos um conjunto de ensaios em materiais compósitos, de matriz epoxídica, com diferente número de camadas de fibra de carbono, e em diferentes composições de espumas de poliuretano. O estudo ergonómico e de design foi realizado com auxílio e recurso às técnicas de prototipagem rápida e virtual.

Na caracterização dos materiais compósitos processados, foram utilizadas as seguintes técnicas: análise de DMA, para determinar a evolução do módulo de elasticidade com a temperatura e a temperatura de transição vítrea; análise estática em flexão em três pontos, para determinar a resistência mecânica e módulo de elasticidade e análise de resistência ao impacto.

A análise das espumas utilizadas no protótipo da cadeira foi realizada com recurso à calorimetria diferencial de varrimento e à análise mecânica dinâmica.

Este trabalho permitiu integrar os parâmetros de processamento, tais como a temperatura de cura e a percentagem de isocianato com as propriedades físicas das peças obtidas, nomeadamente o módulo de elasticidade.

A interligação já referida permitiu a criação de mapas de processamento *versus* propriedades físicas dos materiais, assim como modelos previsionais.

4.2 Materiais compósitos de matriz epoxídica com fibras de carbono

O desenvolvimento de materiais compósitos de matriz polimérica com fibras, bem como das técnicas de projecto e tecnologias de fabrico a eles associados, permite fabricar componentes estruturais de elevado desempenho.

Os materiais compósitos são materiais que possuem propriedades físicas e mecânicas fora do comum, podendo ser processadas de forma a satisfazerem uma determinada aplicação.

Os processos de fabrico de compósitos estão hoje bem adaptados à fabricação de estruturas complexas, o que permite a consolidação das peças com custos de produção reduzidos. Estas características permitem que os compósitos sejam utilizados em muitas aplicações com vantagens em relação aos materiais monolíticos.

4.2.1 Propriedades mecânicas: ensaios estáticos (de tracção)

Na determinação das propriedades mecânicas das diferentes placas, com diferente número de camadas de fibra de carbono, foi utilizada uma máquina de ensaios de marca Shimadzu Autograph.

Os ensaios foram todos realizados à temperatura ambiente e a uma velocidade de 1 mm/min, registando-se a força, o deslocamento e a extensão dos provetes.

Na tabela 4.1, são apresentados os valores médios e desvios padrão das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tracção para materiais compósitos de matriz epoxídica com diferente número de camadas de fibra de carbono.

Na tabela 4.2, são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios de tracção para materiais compósitos de matriz epoxídica com diferente número de camadas de fibra de carbono.

Tabela 4.1 – Resultados relativos aos valores médios e desvios padrão das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tracção.

nº de camadas	Tensão média max. [MPa]	Desvio padrão	Módulo [MPa]	Desvio padrão
1	194,8	23,3	21131,7	961,2
2	254,9	71,9	39038,0	1554,2
3	306,9	81,7	41164,0	1086,6
4	411,8	35,6	51393,7	1085,3
5	366,4	31,3	50978,8	1235,7
6	405,7	72,4	53597,5	700,5
7	419,1	56,5	52915,0	1559,7
8	485,3	22,9	55934,0	320,9
9	435,0	35,0	53485,5	788,2
10	433,2	73,2	54934,5	818,8
11	439,7	43,9	54493,8	337,1
12	470,8	38,3	57464,0	1128,2

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios mecânicos de tracção..

Provete	Nº de camadas	Tensão max. [MPa]	Módulo [MPa]
1	1	206,0	21666,0
2	1	210,5	20022,0
3	1	168,0	21707,0
1	2	204,1	40137,0
2	2	305,8	37939,0
1	3	268,2	40587,0
2	3	210,5	41700,0
3	3	366,6	42393,0
4	3	382,4	39976,0
1	4	420,3	51683,0
2	4	442,3	52305,0
3	4	372,7	50193,0
1	5	401,4	51777,0
2	5	383,3	49584,0
3	5	333,4	50323,0
4	5	347,6	52231,0
1	6	461,9	53626,0
2	6	357,1	53050,0
3	6	473,3	53137,0
4	6	330,6	54577,0
1	7	476,3	53838,0
2	7	349,2	52105,0
3	7	451,3	51158,0
4	7	399,8	54559,0
1	8	480,9	56301,0
2	8	510,1	55795,0
3	8	464,9	55706,0
1	9	389,9	52340,0
2	9	431,2	54030,0
3	9	474,2	53979,0
4	9	444,7	53593,0
1	10	326,1	54955,0
2	10	481,9	53779,0
3	10	446,5	55376,0
4	10	478,3	55628,0
1	11	489,2	54342,0
2	11	449,3	54109,0
3	11	382,7	54876,0
4	11	437,6	54648,0
1	12	493,7	57413,0
2	12	473,5	56904,0
3	12	415,9	56482,0
4	12	500,2	59057,0

Com base nos resultados dos ensaios estáticos de tracção, foram geradas as curvas de resistência mecânica à tracção *versus* número de camadas de fibras, conforme se pode observar na figura 4.1.

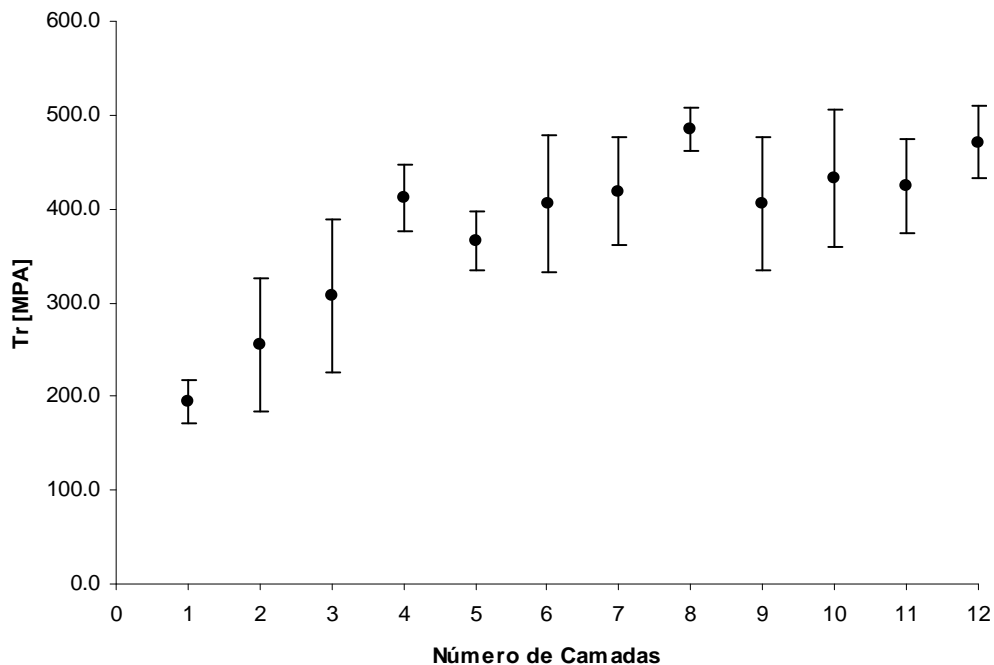


Figura 4.1 – Tensão de rotura para os vários compósitos de matriz epoxídica com diferente número de camadas de fibra de carbono.

Com base nos resultados dos ensaios estáticos de tracção, foram geradas as curvas de módulo de elasticidade *versus* número de camadas de fibras, conforme se pode observar na figura 4.2.

Com base na teoria TCL, pode-se analisar os resultados teóricos com os resultados experimentais. Verifica-se que para os laminados até 4 camadas existe uma grande dispersão de resultados entre os teóricos e os experimentais. Tal facto pode ser justificado com a técnica de processamento utilizada no fabrico de materiais compósitos com menos camadas de fibra de carbono. Através da TLC verifica-se que $E_x = E_y$ (capítulo 2).

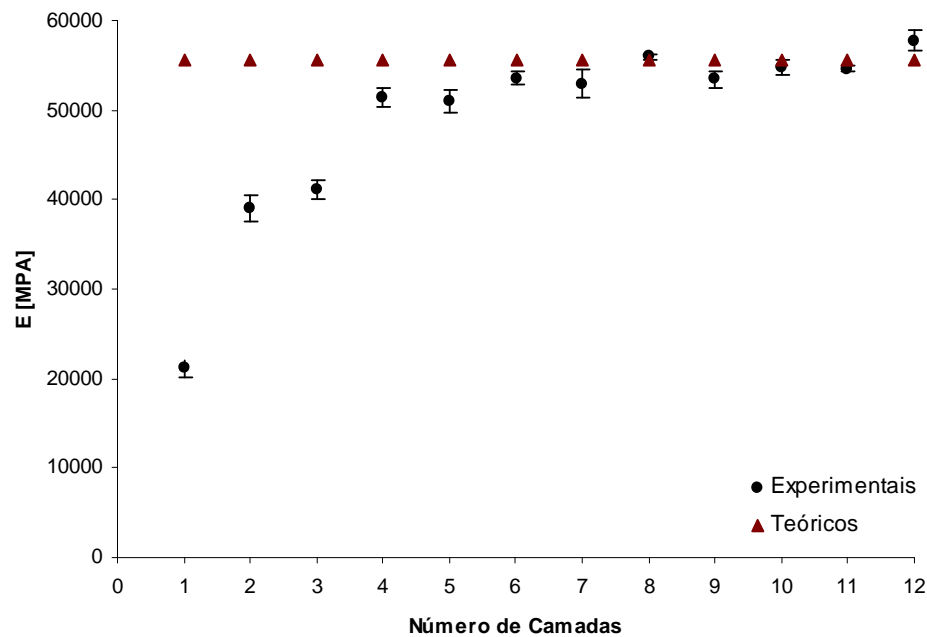


Figura 4.2 – Comparação entre os módulos de Young teóricos e experimentais.

Na tabela 4.3, são apresentados os valores de densidade obtidos para os vários materiais compósitos processados.

Tabela 4.3 – Resultados relativos aos valores médios das densidades por número de camadas de fibra de carbono.

N.º de camadas	Densidade
1	1,21
2	1,27
3	1,35
4	1,35
5	1,35
6	1,34
7	1,34
8	1,35
9	1,34
10	1,35
11	1,37
12	1,37

4.2.2 Propriedades mecânicas

Na caracterização dos materiais compósitos processados foi utilizada a técnica de DMA, para determinar a evolução do módulo de elasticidade com a temperatura e a temperatura de transição vítrea.

Na figura 4.3, estão representadas as curvas relativas à evolução do módulo de Young versus a temperatura para os vários materiais compósitos com diferente número de camadas de fibra de carbono.

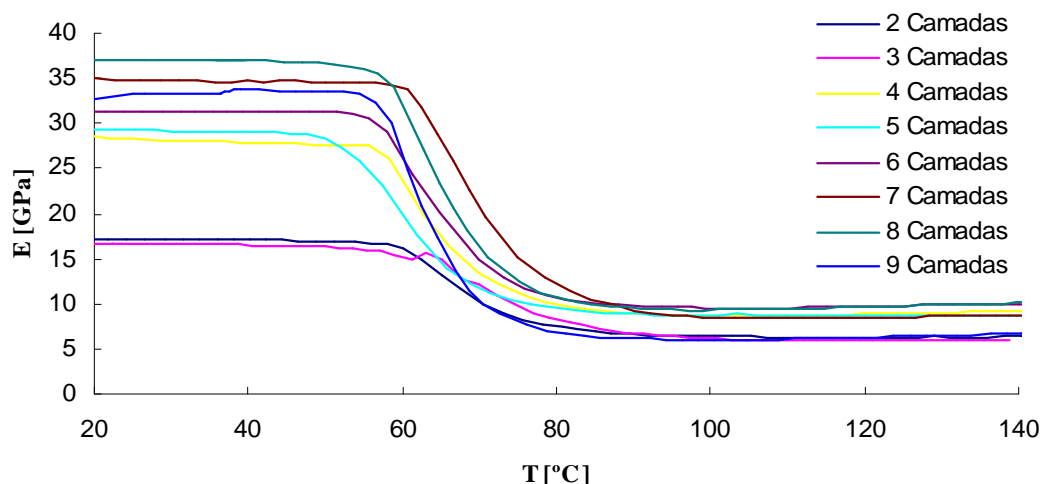


Figura 4.3 – Módulo de Young [GPa] *versus* temperatura [°C] para os vários materiais compósitos de fibra de carbono.

Na figura 4.4, pode observar-se a temperatura de transição vítrea para o material compósito com seis camadas de fibra de carbono. A partir desta figura, foi possível determinar a temperatura de transição vítrea, da ordem de 70°C.

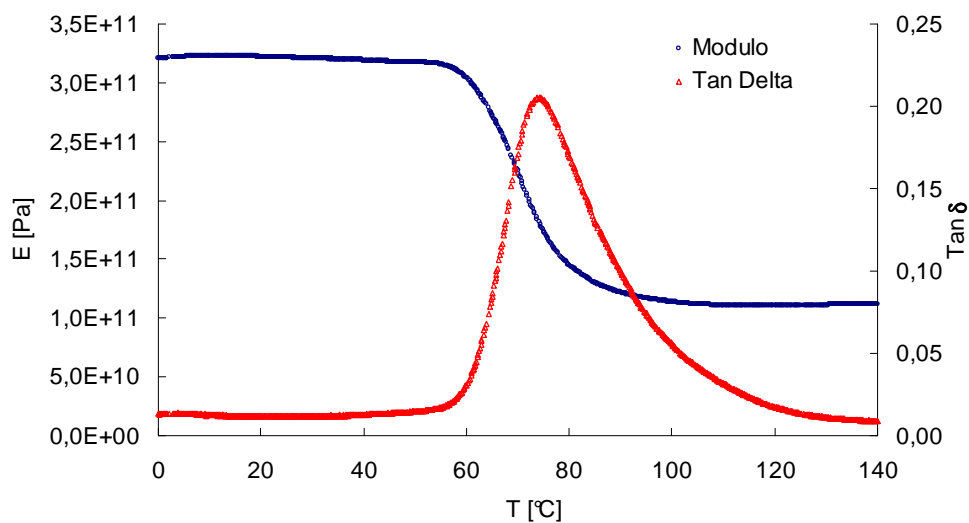


Figura 4.4 – Temperatura de transição vítrea para o material compósito com seis camadas de fibra de carbono.

4.2.3 Ensaios de impacto

Para os ensaios de impacto, a velocidade teórica é 3.05 m/s e a energia teórica é 10.26 J.

Como se pode verificar pela figura 4.5, quanto maior é o número de camadas, maior é a energia absorvida pela estrutura. Este resultado era esperado, já que a estrutura torna-se mais espessa dificultando a penetração.

Na figura 4.6, pode-se observar que quanto maior o número de camadas mais rapidamente a energia é absorvida.

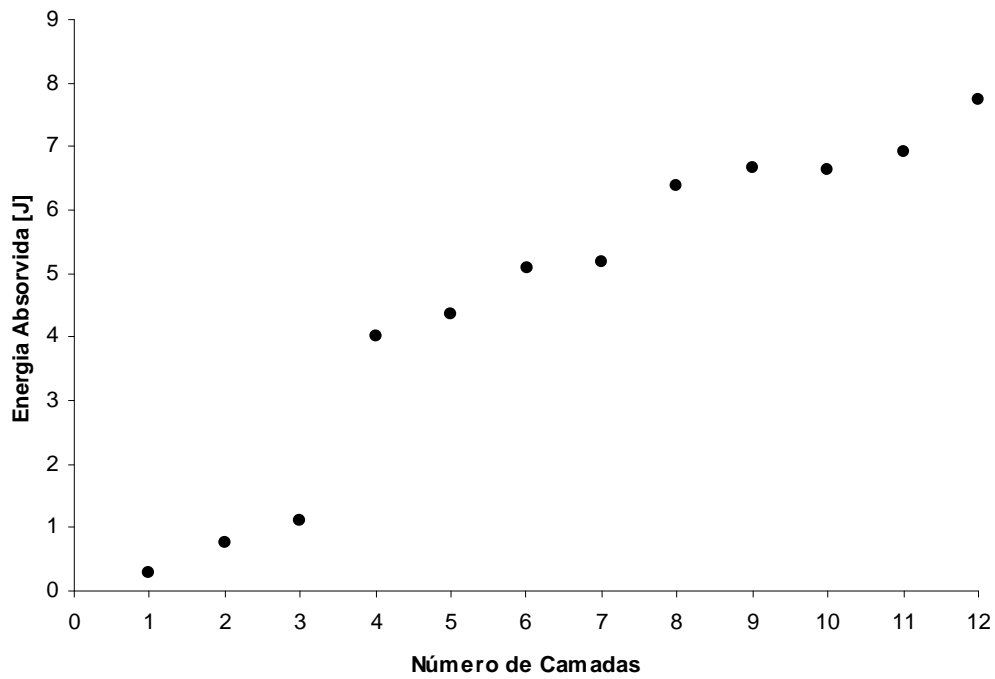


Figura 4.5 – Energia absorvida [J] *versus* número de camadas.

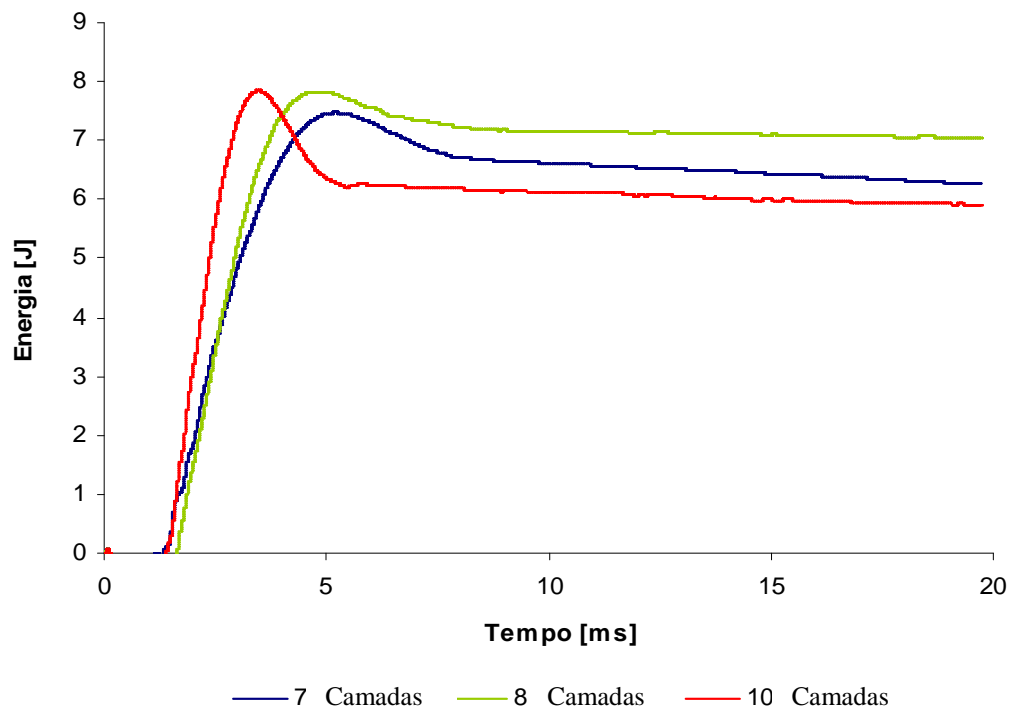


Figura 4.6 – Energia absorvida [J] *versus* tempo [ms].

As figuras 4.7 e 4.8 ilustram a variação da energia de impacto em função da energia absorvida.

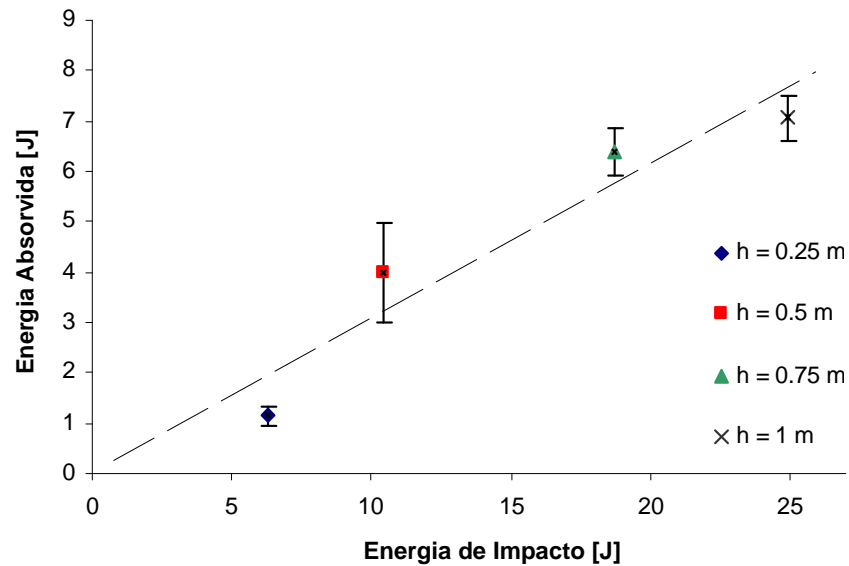


Figura 4.7 – Energia absorvida [J] *versus* energia de impacto [J] – amostra com 4 camadas de fibra de carbono.

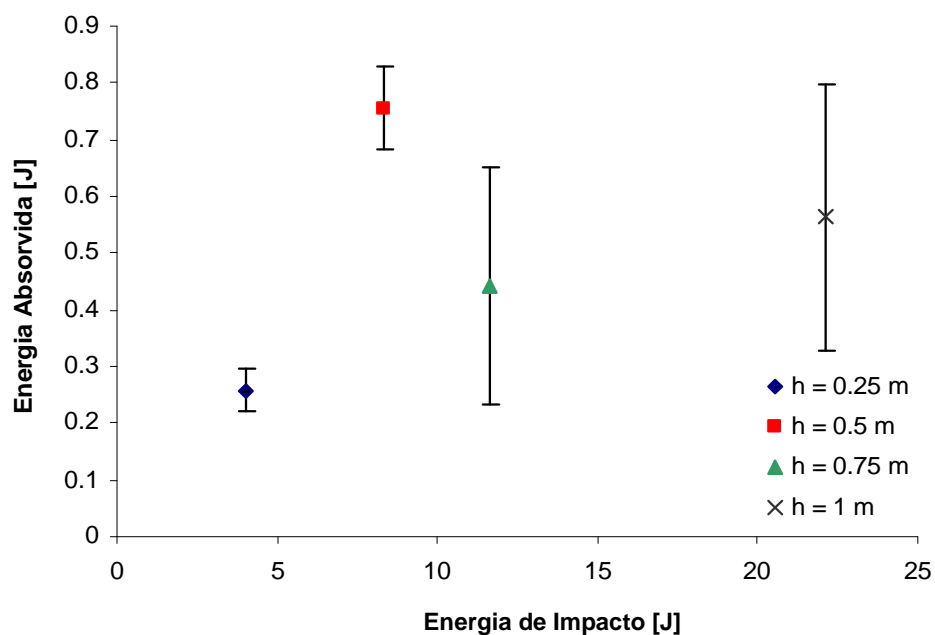


Figura 4.8 – Energia absorvida [J] *versus* energia de impacto [J] – amostra com 2 camadas.

Verifica-se que a energia absorvida é directamente proporcional à energia de impacto na estrutura com 4 camadas (figura 4.7). O mesmo não se verifica para a estrutura 2 (figura 4.8), visto esta ser de espessura reduzida, ocorrendo a rotura da mesma, para as mesmas energias de impacto, havendo uma incorrecta recolha de dados. Na figura 4.9, são apresentadas as duas amostras dos compósitos (2 e 4 camadas de fibra de carbono após o ensaio de impacto).

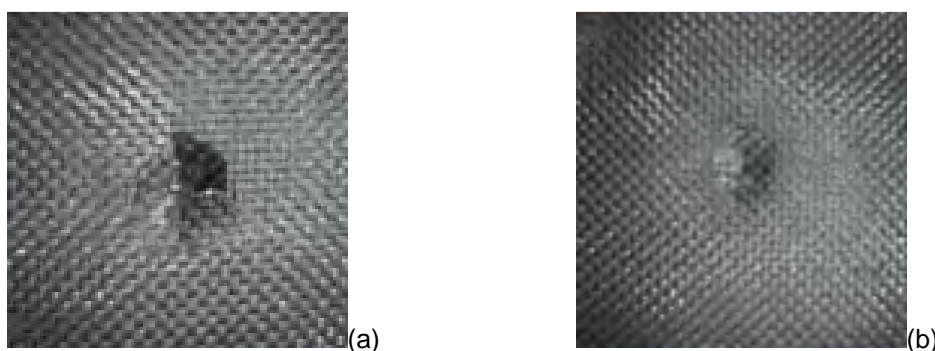


Figura 4.9 – a) Amostra com 2 camadas de fibra de carbono e **b)** amostra com 4 camadas de fibra de carbono após o impacto a $h=0.5$ m.

4.3 Espumas de poliuretano

Foram processadas e estudadas várias espumas de poliuretano com diferentes concentrações de isocianato e diferentes tempos de cura.

A correlação entre os dados obtidos de ambos os equipamentos, o DMA e o DSC-C80, permitiu criar mapas de composição do material – propriedades mecânicas e parâmetros de processamento para obtenção de peças finais com características especiais.

Na figura 4.10, apresentam-se nove amostras que representam a variação da morfologia das células com a temperatura e composição. O aumento da temperatura de cura, sem mudar a composição, permite a produção de espumas com maiores células abertas. Não se observou nenhuma variação na dimensão de células, quando a composição é alterada à temperatura constante.

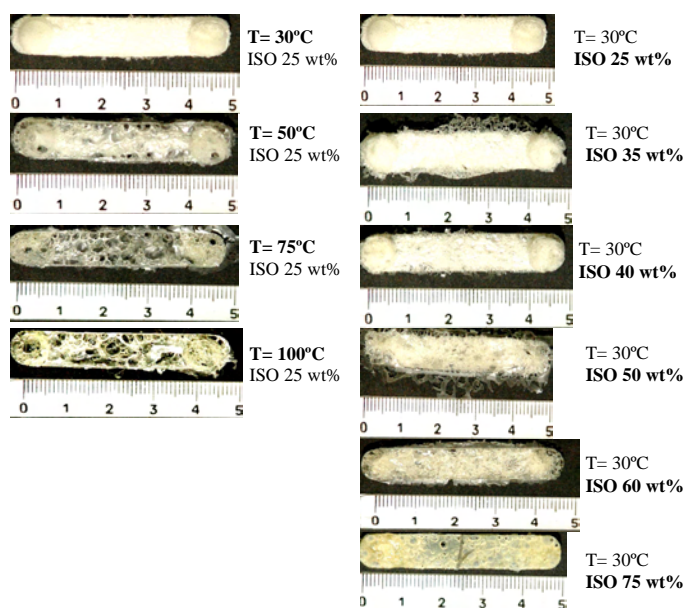


Figura 4.10 – Variação da estrutura das amostras de espuma flexível por injeção.

Os testes de DMA foram levados a cabo usando as 24 amostras e o módulo de elasticidade obtido pode ser relacionado com as condições de processamento, designadamente a temperatura de cura e percentagem de isocianato.

Assim, nas figuras que se seguem, pode-se analisar o comportamento do módulo de elasticidade *versus* concentração de isocianato para uma temperatura de cura de 30°C (figura 4.11), 50°C (figura 4.12), 75°C (figura 4.13) e 100°C (figura 4.14).

Com base na análise das figuras, pode-se concluir que, com o aumento da temperatura de ensaio, o módulo de elasticidade diminui. A percentagem de isocianato na mistura (em massa) só influencia a variação do módulo de elasticidade para valores superiores a 50% (em massa). Verifica-se igualmente que a influência da percentagem do isocianato é tanto maior quanto maior for a temperatura de cura (comparar a figura 4.11 à 4.14). Assim, pode-se concluir que, no processamento de materiais em que há necessidade de se obterem módulos mais elevados, devem-se utilizar percentagens de isocianato superiores a 50% e temperaturas de cura superiores a 75°C.

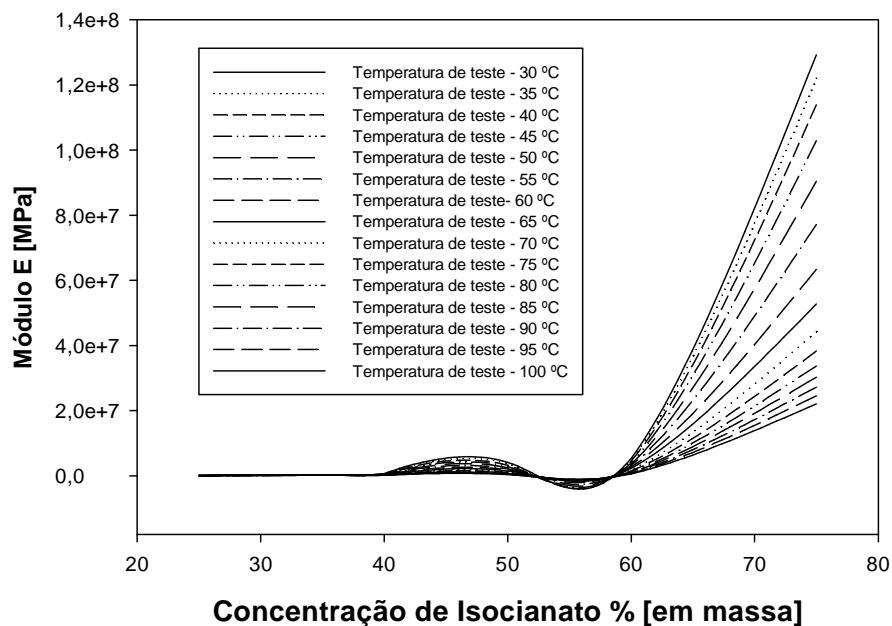


Figura 4.11 – Temperatura de cura 30°C, módulo E *versus* concentração de isocianato *versus* temperatura de teste.

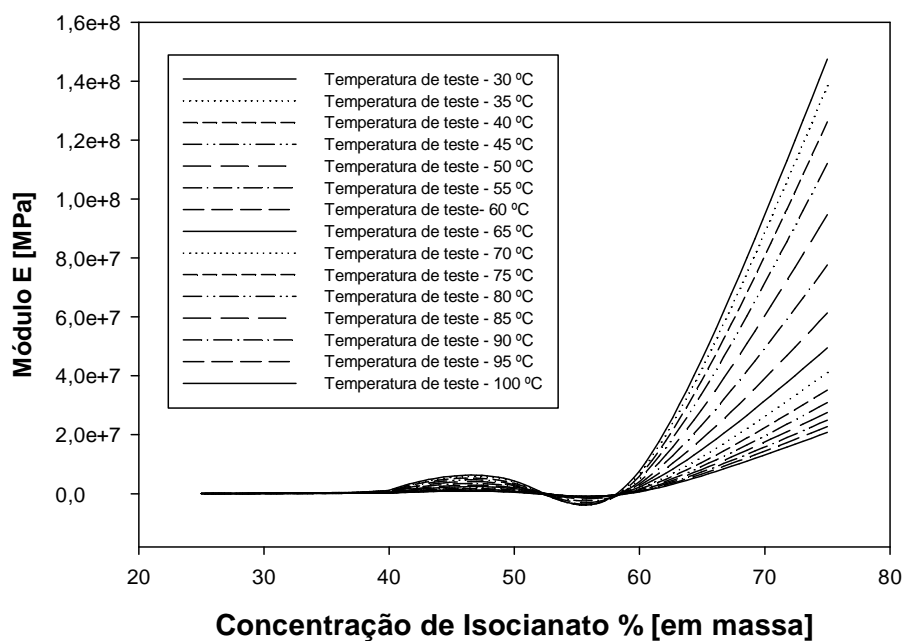


Figura 4.12 – Temperatura de cura 50°C, módulo E *versus* concentração de isocianato *versus* temperatura de teste.

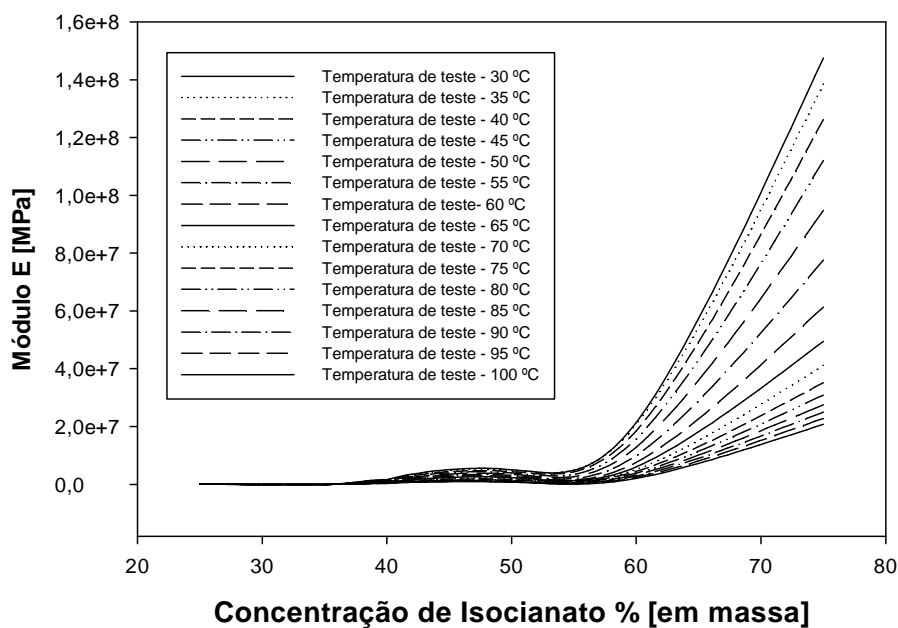


Figura 4.13 – Temperatura de cura 75°C, módulo E *versus* concentração de isocianato *versus* temperatura de teste.

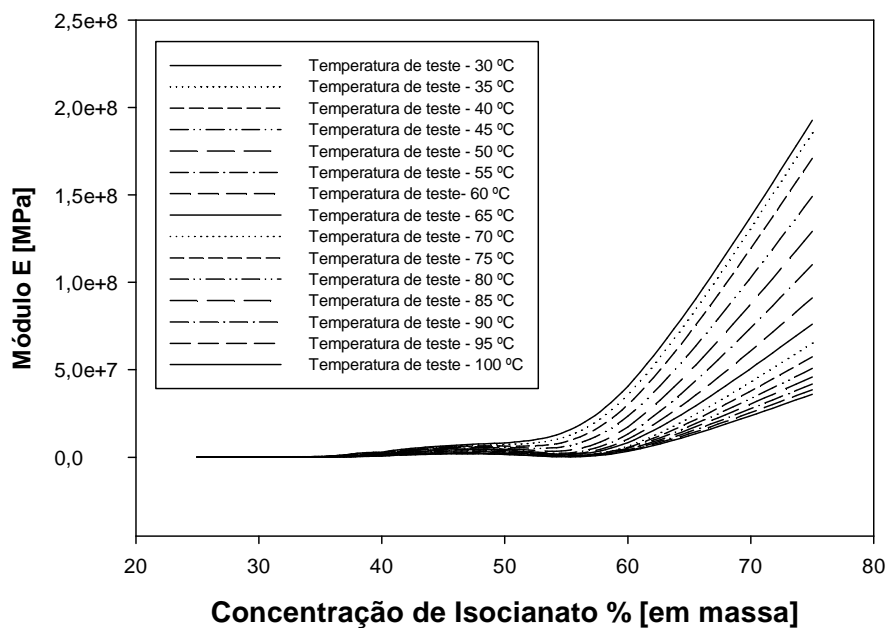


Figura 4.14 – Temperatura de cura 100°C, módulo E *versus* concentração de isocianato *versus* temperatura de teste.

Quando, para uma dada concentração de isocianato, se analisa a influência de temperatura de ensaio e de cura sobre o valor do módulo de elasticidade, verifica-se que, de forma geral, o módulo aumenta com o aumento das temperaturas referidas (figura 4.15 à figura 4.18).

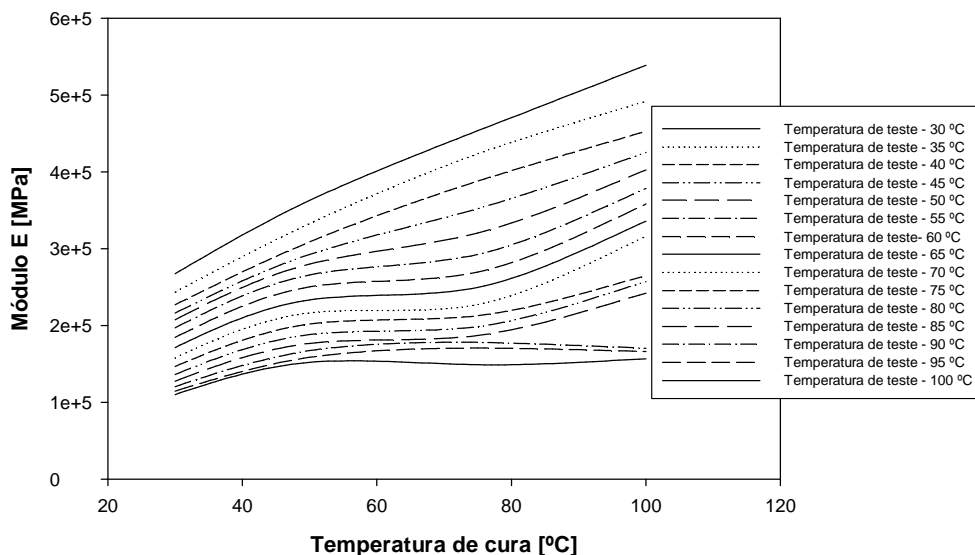


Figura 4.15 – Concentração de isocianato 35.5%, módulo E versus temperatura de cura

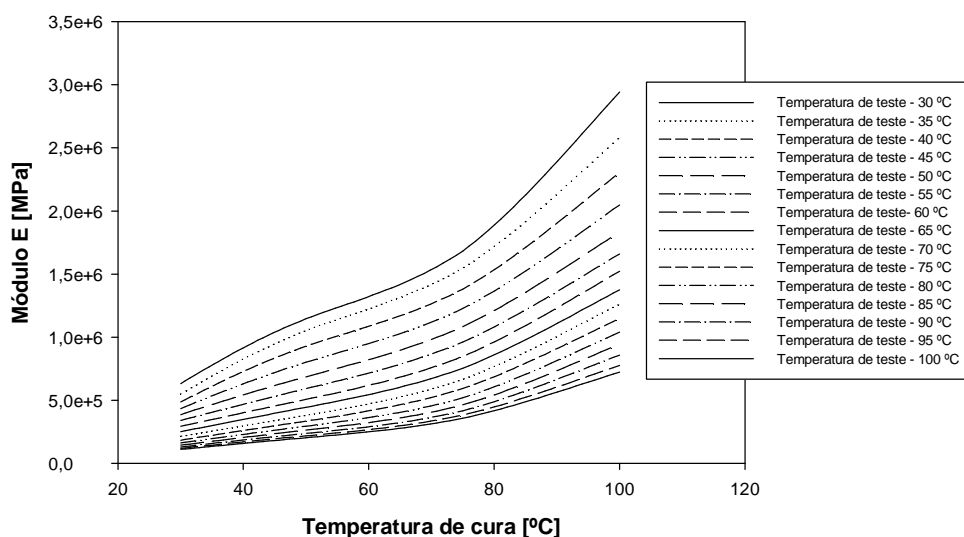


Figura 4.16 – Concentração de isocianato 40%, módulo E *versus* temperatura de cura

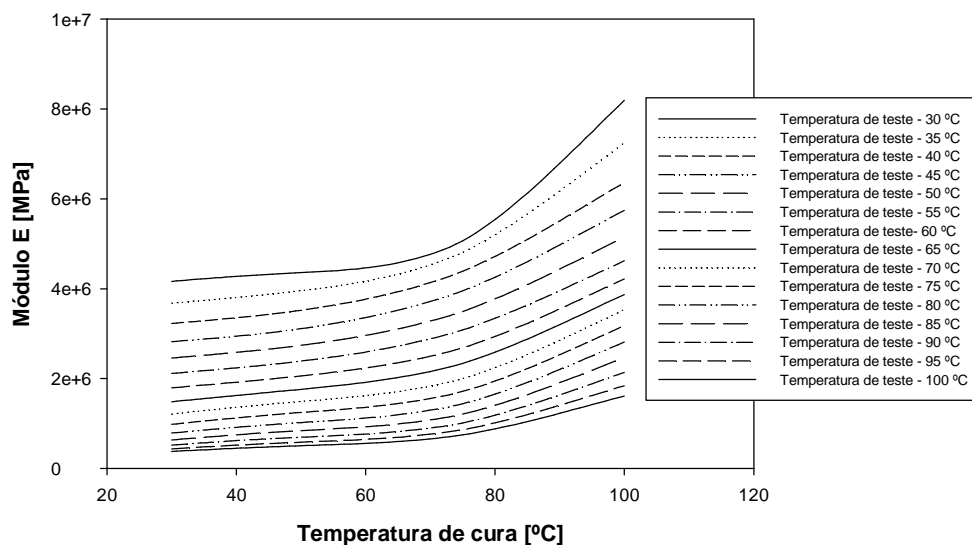


Figura 4.17 – Concentração de isocianato 50%, módulo E *versus* temperatura de cura

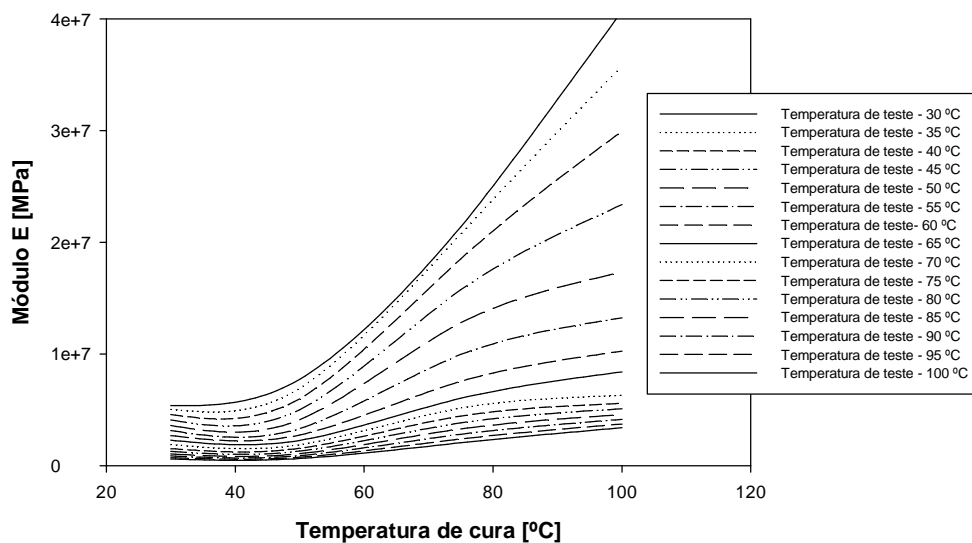


Figura 4.18 – Concentração de isocianato 60%, módulo E *versus* temperatura de cura

Da observação da figura 4.19 e 4.20, confirma-se o que já foi referido e está evidenciado nos gráficos anteriores, isto é, com o aumento da temperatura de cura e para uma maior percentagem de isocianato na mistura, o módulo de elasticidade é maior.

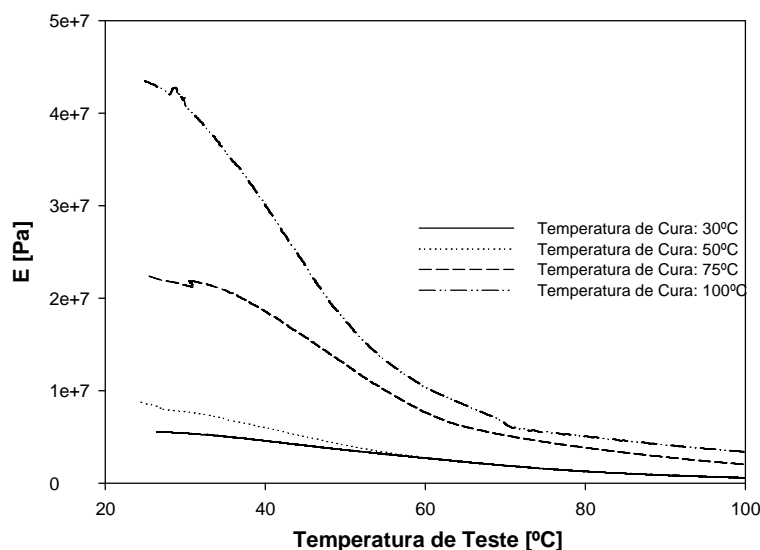


Figura 4.19 – Variação do módulo E *versus* temperatura de teste para diferentes temperatura de cura.

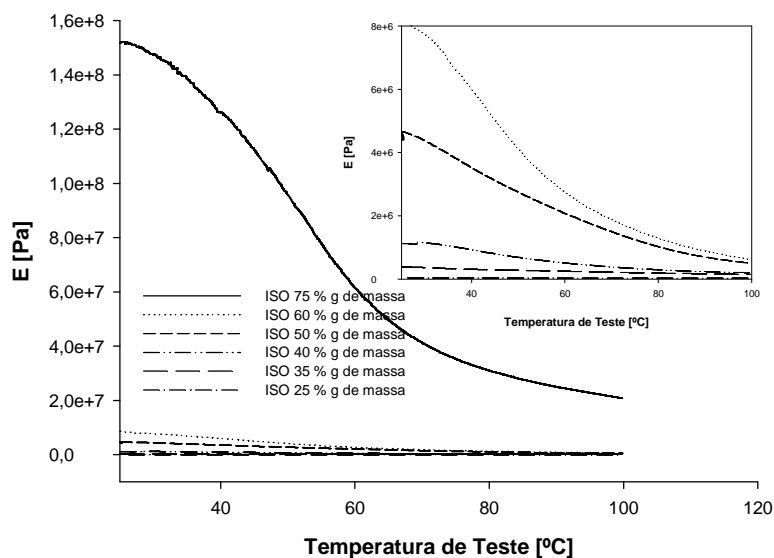


Figura 4.20 – Variação do módulo E *versus* temperatura de teste para diferentes concentrações de isocianato

Os testes de DSC e DMA que foram realizados deram origem a mapas (figura 4.21 e figura 4.22) que permitem a escolha do material apropriado para uma dada temperatura de operação, e os parâmetros de processamento para a obtenção de uma peça final com as características requeridas.

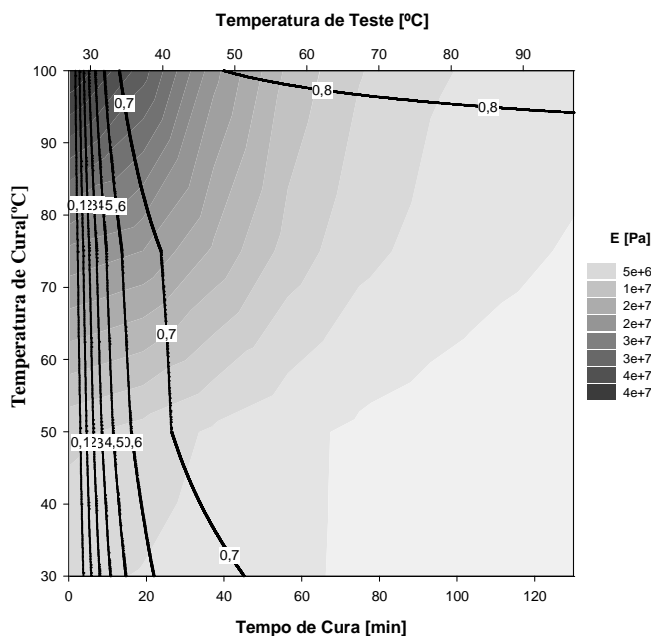


Figura 4.21 – Módulo de Young e polimerização (conversão) em função da temperatura de cura e temperatura de ensaio para uma composição de 60% de isocianato.

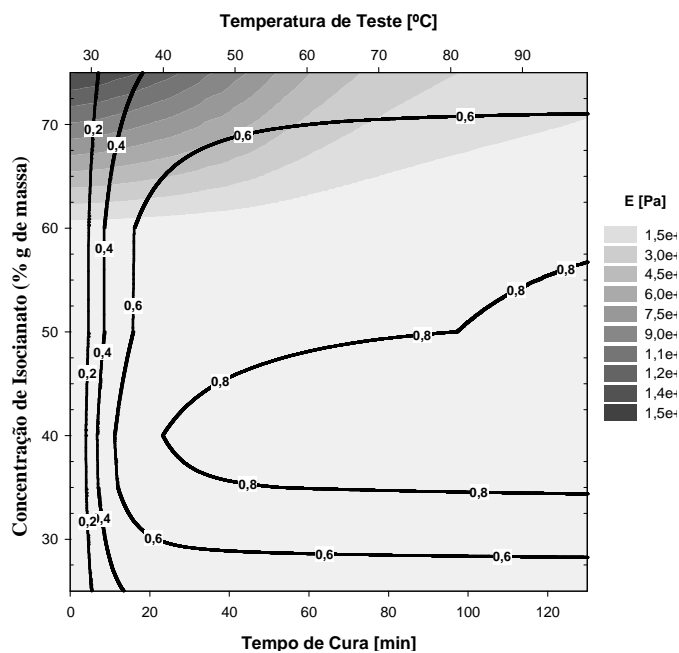


Figura 4.22 – Módulo de Young e conversão parcial em função da concentração de isocianato e temperatura de ensaio para uma temperatura de cura 50°C.

Como se observa na figura 4.23a, a máxima taxa de polimerização é a obtida com uma mistura estequiométrica. Para composições diferentes, a taxa de polimerização diminui.

A temperatura de processamento dos poliuretanos influencia de forma decisiva a taxa de polimerização, como é espectável. Experimentalmente, observa-se uma maior taxa de polimerização para temperaturas de processamento mais elevadas (figura 4.23b).

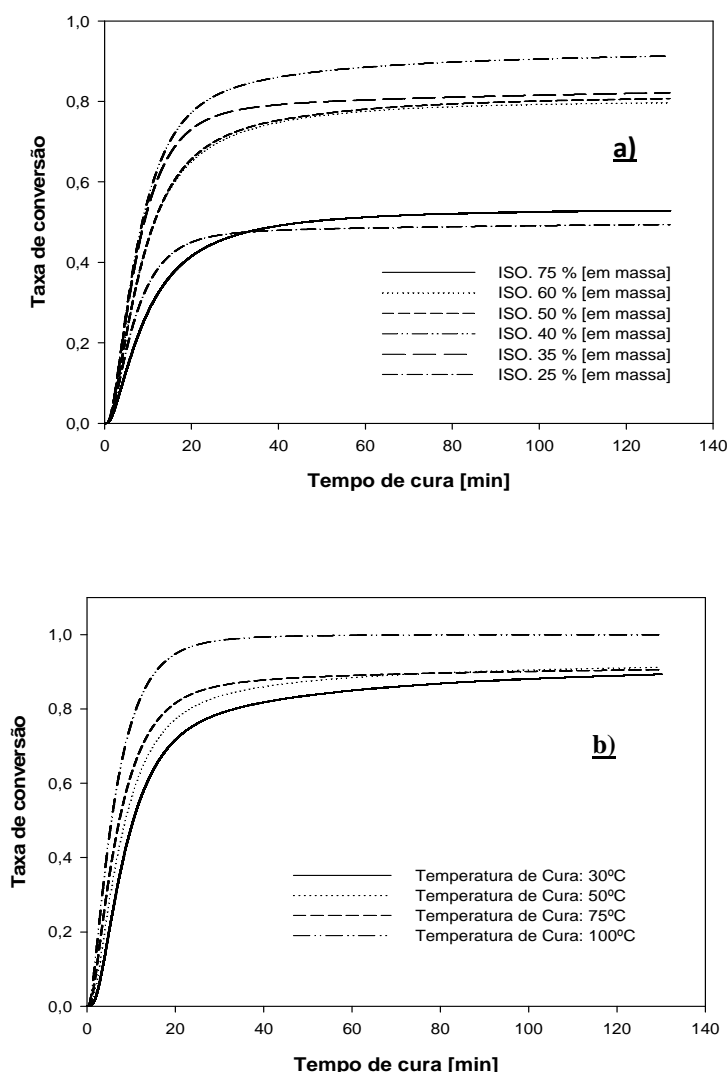


Figura 4.23 – Dados obtidos a partir das experiências DSC-C80: a) conversão parcial *versus* tempo de cura para diferentes conteúdos de isocianato; b) conversão parcial *versus* tempo de cura para diferentes temperaturas de cura

5 CASO DE ESTUDO

5.1 Introdução

Com este trabalho, pretende-se conhecer todas as etapas de desenvolvimento de um produto aplicado ao desenvolvimento do protótipo de uma cadeira. Pretende-se que este abranja as mais diferentes áreas, desde o projecto e fabrico assistido por computador, materiais compósitos, ergonomia, prototipagem, projecto mecânico, entre outras.

O desenvolvimento do produto consiste numa metodologia estruturada e genérica, que tem como objectivo transformar as necessidades dos clientes em produtos vencedores (novos ou adaptados). O sucesso no desenvolvimento de um produto traduz-se na comercialização deste com uma margem significativa de lucro. No entanto, o investimento a realizar no desenvolvimento deve ser equacionado com base nos seguintes factores: qualidade do produto a desenvolver, custo do produto, capacidade, tempo e custo de desenvolvimento. A qualidade de um produto está relacionada com a capacidade de este satisfazer e surpreender os clientes, da sua fiabilidade, bem como do seu desempenho. Relativamente ao custo do produto, este inclui os custos de produção, custos relativos ao processo de fabrico e matérias-primas. A capacidade de desenvolvimento tem a ver com a experiência acumulada de desenvolvimento e processamento de novos materiais, com o objectivo de conceber soluções inovadoras. Os custos relativos a estas fases representam uma parte significativa de todo o investimento no novo produto. Uma boa performance destes factores poderá traduzir-se num sucesso de vendas, com as significativas mais valias.

O desenvolvimento do produto é um trabalho que exige a colaboração de todos os sectores de uma determinada empresa, sendo de salientar os seguintes: projecto, produção e marketing. O projecto desempenha um papel importante na definição física do produto, de acordo com o estabelecido com as novas necessidades dos clientes; no projecto estão incluídos os estudos das várias áreas de engenharias, estudos ergonómicos e ecológicos. À produção cabe-lhe projectar e operar o sistema de fabrico necessário ao fabrico do produto. O

marketing relacional tem como função estabelecer contactos entre a empresa e o cliente, de forma a promover o lançamento do novo produto; esta área racional frequentemente tem um papel importante na identificação de novas oportunidades de negócios.

As equipas de desenvolvimento do produto devem ser criadas em função do tipo de produtos a inovar. Assim, estas equipas poderão incluir técnicos com conhecimentos nas várias áreas de formação, nomeadamente, engenharia, economia, marketing, design e outras áreas do conhecimento, em função da gama de produtos a desenvolver.

De uma forma resumida, as fases do desenvolvimento de um produto podem ser visualizadas de acordo com a figura 5.1.

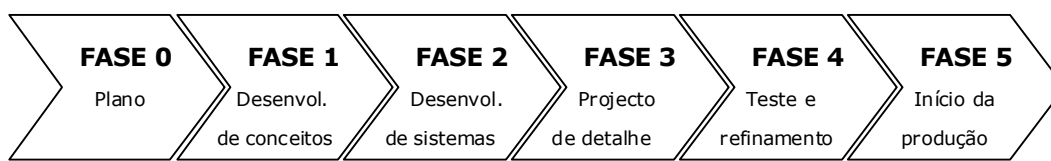


Figura 5.1 – Processo de desenvolvimento de produto.

5.2 Estudo de mercado

Na fase inicial do desenvolvimento de um determinado produto, é importante desenvolver uma análise de mercado lógica. O estudo de mercado é a ferramenta certa para suprir a necessidade de desenvolver estratégias para valorizar marcas, conhecer melhor os consumidores, identificar a estrutura da concorrência, enfim, obter informações que possam orientar não só a formulação de um plano de marketing, como a tomada de decisões mais quotidianas.

Seguidamente, será apresentado um pequeno estudo de mercado, começando por fazer referência à evolução deste tipo de produtos, fabricantes existentes e estudos relevantes. Na figura 5.2, pode-se observar diferentes tipologias de cadeiras.



Figura 5.2 – Tipologias de cadeiras



Figura 5.3 – Tipologias de cadeiras em função da verticalidade (do corpo) e flexibilidade de uso

O estudo de análise de design de cadeiras foi realizado a partir de trabalho de pesquisa, onde foram analisados vários fabricantes, que nos pareceram mais importantes, figura 5.2 e 5.3. Neste trabalho de pesquisa pretendeu-se procurar fabricantes que comercializassem cadeiras da mesma gama de qualidade, conforto e inovação. Deste modo, os produtos encontrados foram divididos por categorias de 1 a 5, 1 para a cadeira com um design mais conservador e 5 para um design mais inovador, figura 5.2. A partir desta figura, é possível ter uma melhor percepção do mercado, bem como a sua evolução.

Na figura 5.3, pode-se observar diferentes tipologias de cadeiras, em função da verticalidade (do corpo) e flexibilidade de utilização.

Após uma análise geral das várias tipologias de cadeiras existentes no mercado, houve a necessidade de definir a área de localização desejada para o desenvolvimento do nosso produto, tendo sido seleccionada a área correspondente ao círculo vermelho indicada na figura 5.4, em função da relação qualidade/inovação dos vários fabricantes de cadeiras.

Nas figuras 5.5 e 5.6, é possível observar as várias posições possíveis do corpo humano e modelos possíveis de cadeiras.

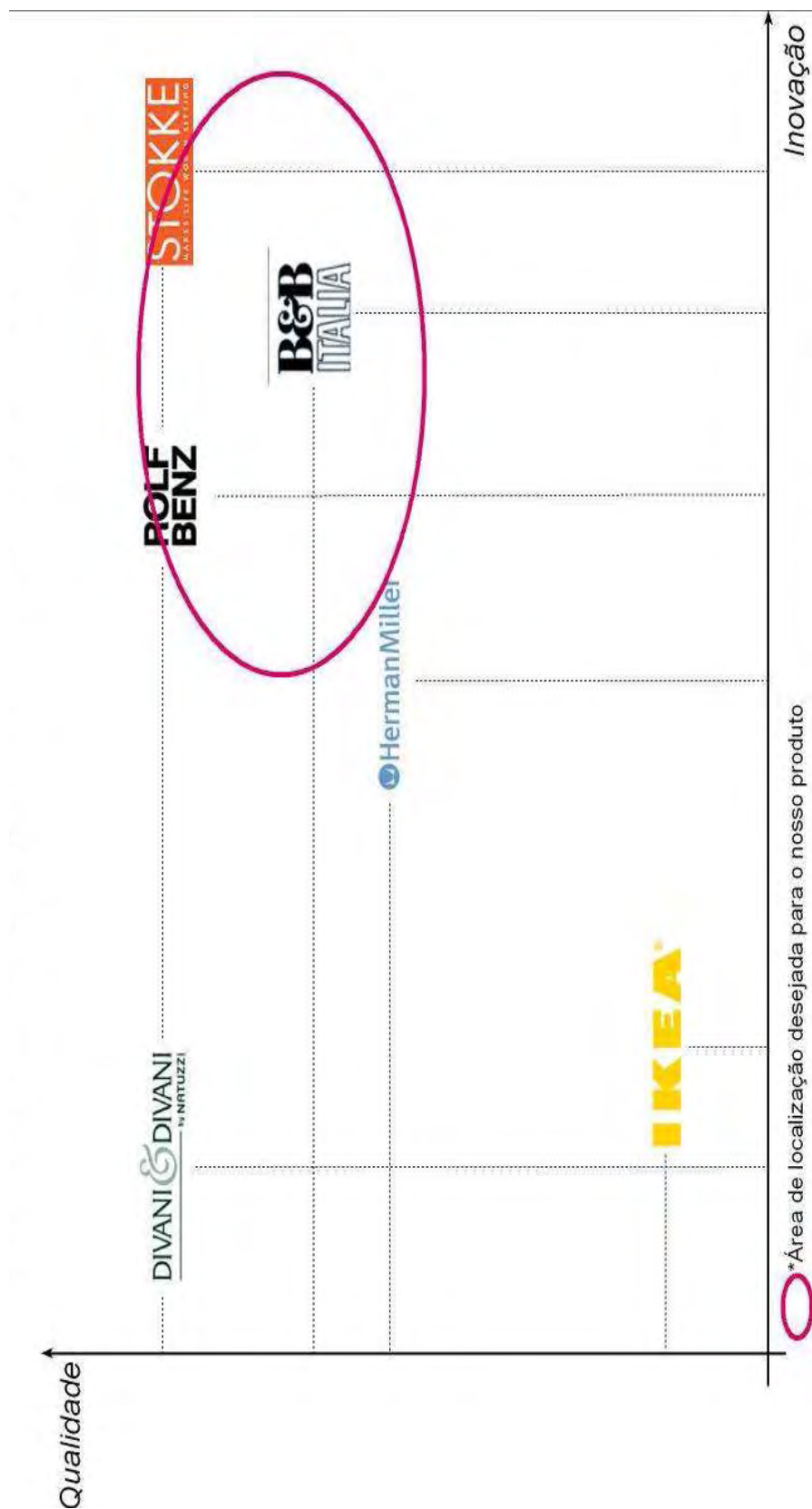


Figura 5.4 – Relação qualidade/inação dos vários fabricantes de cadeiras

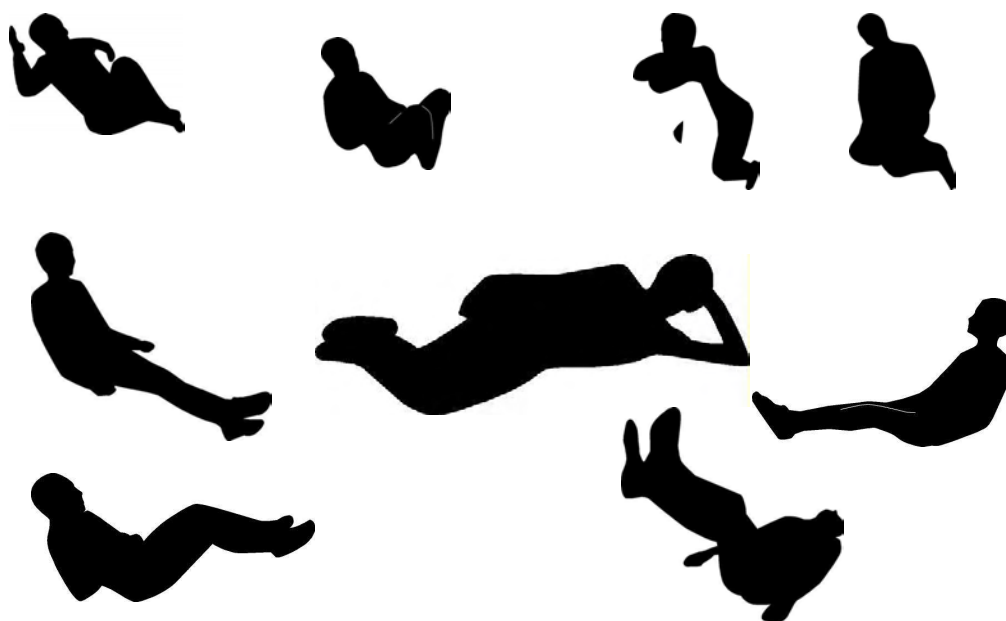


Figura 5.5 – Posições várias do corpo humano

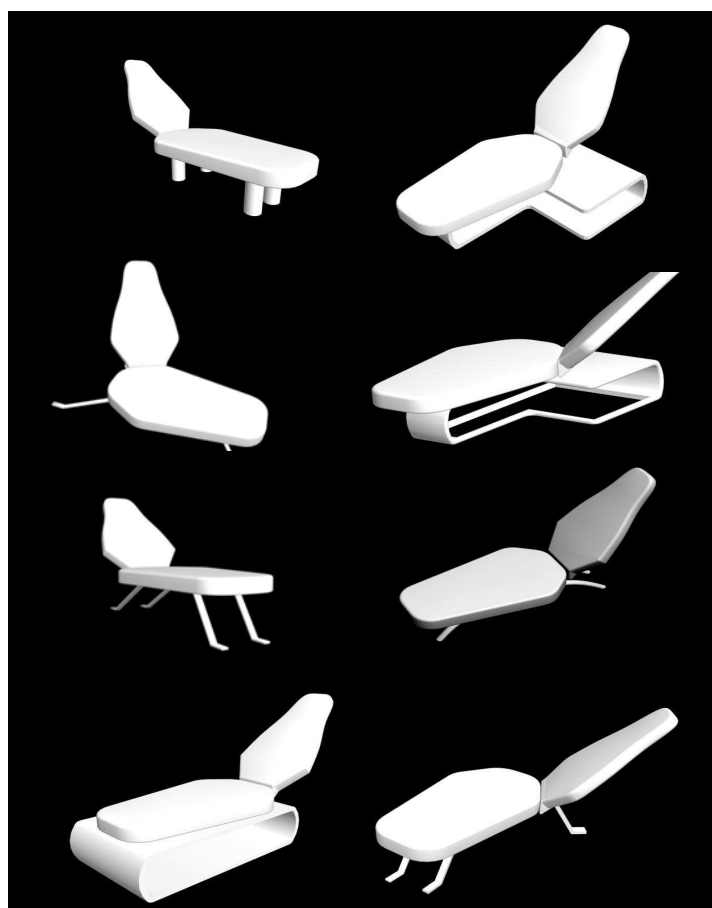


Figura 5.6 – Modelos possíveis de cadeiras

5.3 Análise Swot

Uma análise SWOT é uma forma muito utilizada de fazer um diagnóstico estratégico. Pretende-se com esta análise definir as relações existentes entre os pontos fortes e fracos do produto com as tendências mais importantes que se verificam na envolvente global, seja ao nível do mercado global, do mercado específico, da conjuntura económica, das imposições legais, etc.

Seguidamente, são apresentados, de forma sucinta, os diversos pontos da análise *SWOT*.

Pontos Fortes

- Produto Ergonómico;
- Design inovador e atraente;
- Cumpre as normas aplicáveis.

Pontos Fracos

- Restrição do mercado;
- Muita oferta de diferentes tipologias de cadeiras.

Oportunidades

- Desenvolver produtos que conjuguem design, ergonomia e bem-estar;

Ameaças

- Produto pode não ser bem aceite;
- Público muito influenciável;
- Risco de cópia do produto.

5.4 Projecto conceptual

O produto que se pretende desenvolver é uma cadeira de lazer em material compósito com design apelativo, com características ergonómicas. A introdução de uma forte componente ergonómica e de design (estética) será forte aposta na concepção deste produto. Este protótipo de cadeira deve permitir o apoio total do corpo, desde apoio para os pés e cabeça, sendo que os braços podem ter ou não uma posição de repouso. Deve ter possibilidade de regulação de posição vertical ou horizontal do corpo, de forma a poder adaptar-se a várias actividades, tais como ler ou dormir. Deve, também, ter possibilidade de se adaptar ao utilizador (regulação antropométrica), no que diz respeito ao apoio para os pés, apoio para a cabeça e apoio da zona lombar.

Moldação do protótipo de cadeira

O CAD inclui um grupo de aplicações que permitem aos gabinetes técnicos, designers e engenheiros, conceber, testar, avaliar e definir um produto para produção no menor tempo possível. No início da utilização de softwares de CAD no desenvolvimento de componentes, o objectivo principal era aumentar a produtividade na elaboração dos respectivos desenhos técnicos. A utilização destas ferramentas permitiu alcançar resultados significativos, popularizando-se na medida em que os microcomputadores se foram tornando mais poderosos e mais acessíveis. O software usado no desenvolvimento da cadeira foi SolidWorks e o CATIA V5.

Ergonomia e antropometria

Na concepção e desenvolvimento CAD do protótipo da cadeira foi utilizado um percentil de 95% da população europeia, no que diz respeito ao estudo ergonómico.

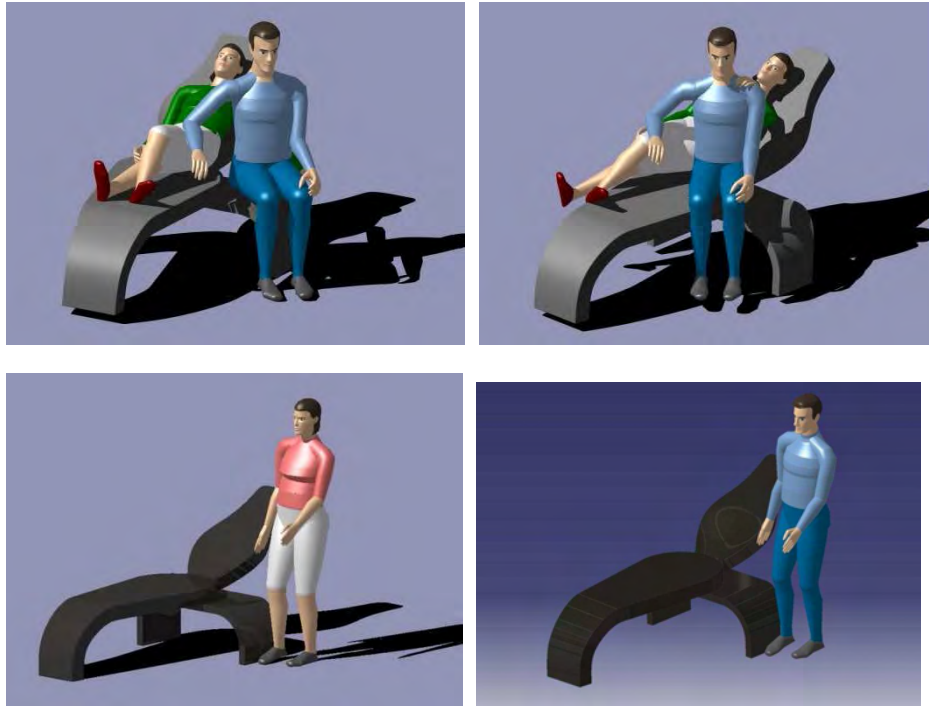


Figura 5.7 – Optimização ergonómica – CATIA V5.

Através da aplicação do método de RULA e para as várias posições, obteve-se uma classificação de dois (figura 5.8), o que indica que a postura é aceitável, se não for mantida por longos períodos de tempo.



Figura 5.8 – Optimização ergonómica – Rula.

A cadeira deve permitir o apoio total do corpo, desde apoio para os pés e cabeça, sendo que os braços podem ter ou não onde se apoiar. A mesma deve permitir a regulação de posição vertical a horizontal do corpo, para que a mesma se possa adaptar a várias actividades, como ler, ou dormir. A regulação antropométrica, em que a cadeira se adapta a cada utilizador; apoio para os pés, apoio para a cabeça e apoio da zona lombar, é essencial para se adaptar à pessoa que usa a cadeira.

A antropometria tem como objectivo avaliar posturas e distâncias que permitam uma boa adaptabilidade dos utilizadores com os equipamentos. No mercado considerado no estudo, Portugal, não existem dados antropométricos disponíveis sobre a sua população, mas tal não impede o correcto dimensionamento do produto. Para essa análise, teve-se em consideração os parâmetros antropométricos dispostos em Panero e Zelnik, conforme documenta a tabela 5.1. A tabela antropométrica apresenta percentis que expressam a percentagem de pessoas, pertencentes a uma dada população, que têm determinada dimensão corporal. Os percentis extremos geralmente utilizados em projectos são o 5 (mínimo) e o 95 (máximo), de modo que 90% da população possa ser contemplada no projecto.

Tabela 5.1 – Dados antropométricos da população americana

Percentil	Peso [kg]	Estatura [m]	Altura cabeça assento [mm]	Altura do popliteal [mm]	Comprimento nádega popliteal [m]	Comprimento nádega joelho [mm]
1	50,8	1,57	81	37,8	41,9	51,6
5	57,2	1,62	84,3	39,3	43,9	54,1
50	75,3	1,74	90,7	43,9	49	59,2
95	96,2	1,85	96,5	49	54,9	64
99	109	1,9	98,8	50,8	57,7	66,8

Após a modelação do produto em SolidWorks, tendo em conta aspectos ergonómicos, aspectos referentes à qualidade e inovação, aspectos referentes ao

mercado, são apresentados, nas figuras seguintes, os resultados desses trabalhos.

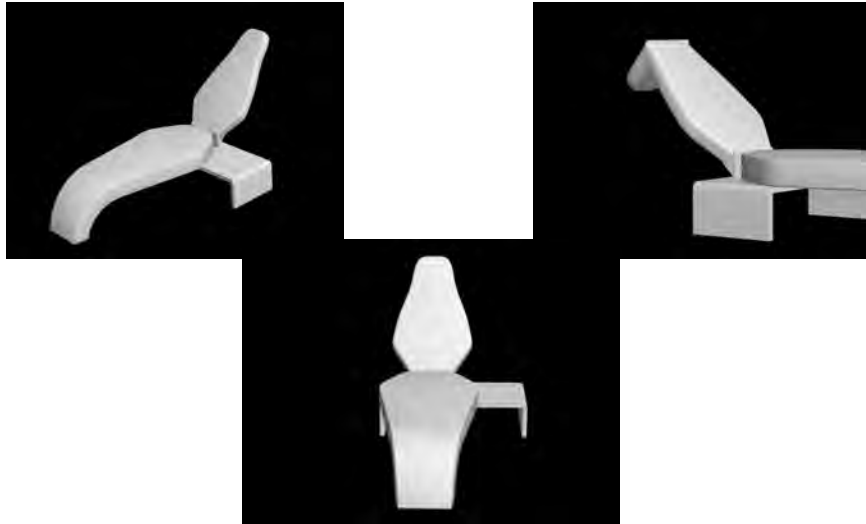


Figura 5.9 – Design do protótipo da cadeira de lazer

Nas figuras 5.9 e 5.10, pode-se observar o design da cadeira, com a apresentação das várias vistas. Naturalmente, o design, os estudos ergonômicos e antropométricos e estudos de novos materiais são dos aspectos importantes a ter em conta no desenvolvimento do produto.

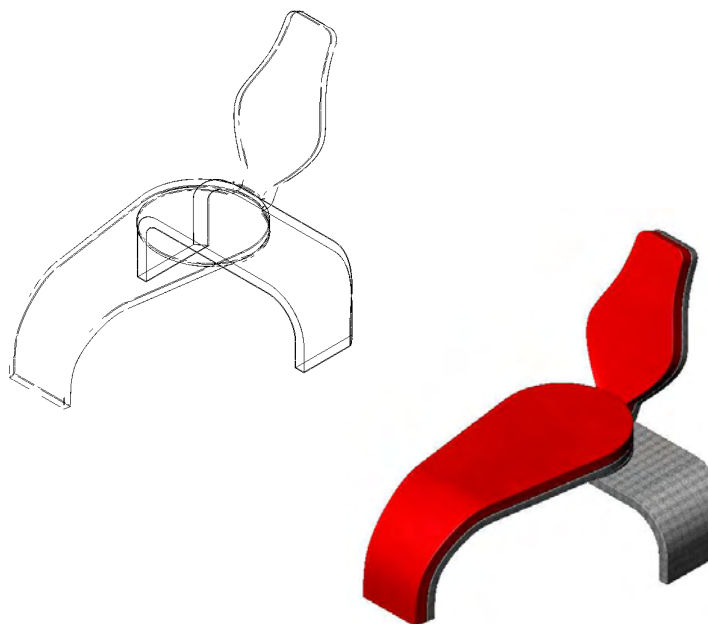


Figura 5.10 – Design do protótipo da cadeira

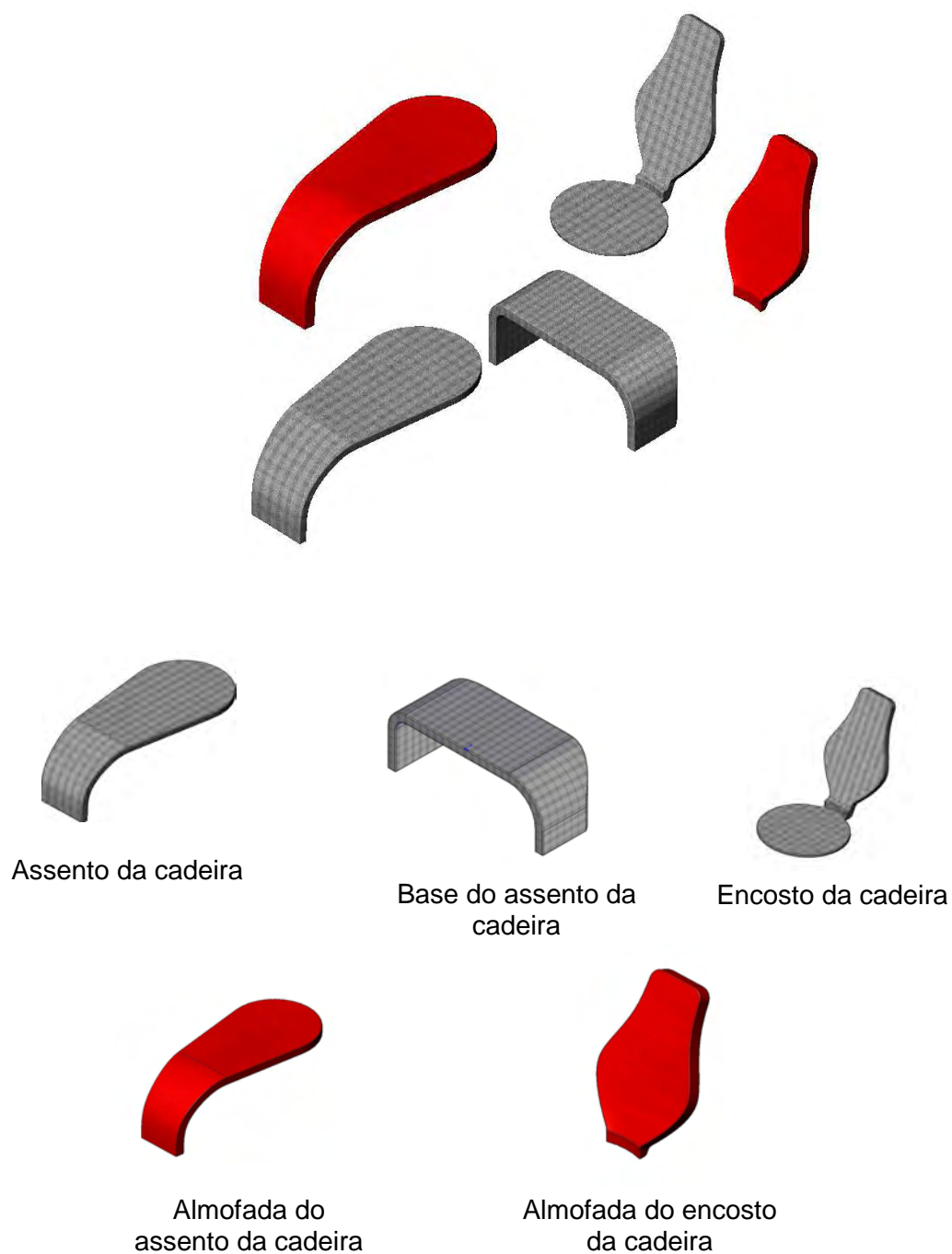


Figura 5.11 – Representação esquemática dos vários componentes da cadeira

Protótipo conceptual

No desenvolvimento do protótipo da cadeira foram utilizadas técnicas de prototipagem rápida. Foi produzido um protótipo em cera para análise das várias soluções consideradas neste trabalho. Assim, foi possível obter um modelo físico para estudo da solução a implementar, com recurso a um equipamento Thermojet. Este tipo de equipamento Thermojet, que permite a deposição de material fundido (cera), foi desenvolvido pela 3D Systems e permite produzir de forma rápida protótipos para apoiar a concepção de produtos. A construção de modelos é feita por acção de uma cabeça de extorsão, que deposita uma cera com a geometria da secção correspondente a cada camada do modelo.

Na figura 5.9, pode-se observar o equipamento Thermojet utilizado na obtenção de protótipos e na figura 5.10 pode-se observar o protótipo em cera.



Figura 5.12 – Equipamento Thermojet.

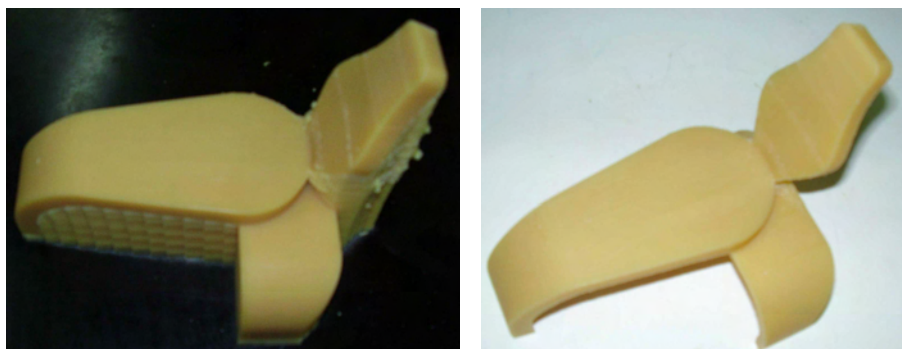


Figura 5.13 – Protótipo em cera

Análise numérica

Um modelo numérico foi desenvolvido directamente a partir da representação CAD do protótipo da cadeira. A geometria foi automaticamente dividida em 10 nós de elementos tetraédricos, que são adequados para aproximar objectos não regulares, como o proposto para a cadeira. Na figura 5.14, é possível observar a malha de elementos finitos, composta por 11635 elementos e 20949 nós, e as condições de contorno. As pernas do protótipo de cadeira foram consideradas fixas e foi considerada uma carga de 200 kgf, uniformemente distribuída como indicado, replicando o peso de uma pessoa. O material foi considerado ser ortotrópico e ter comportamento elástico linear com $E_x = E_z = 55 \text{ GPa}$ e $E_y = 5 \text{ GPa}$.

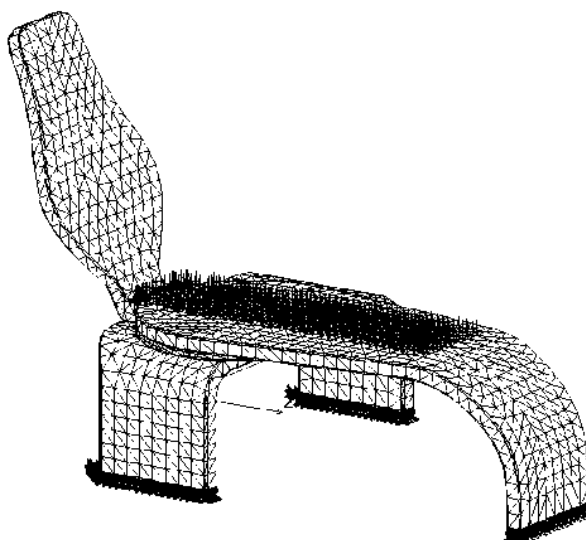


Figura 5.14 – Malha de elementos finitos e condições fronteira.

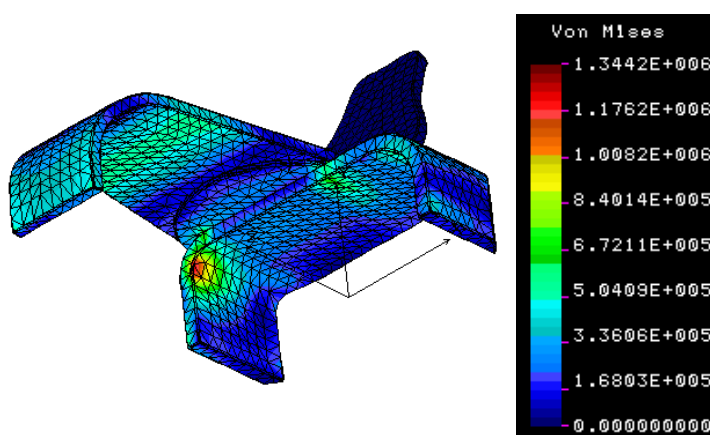


Figura 5.15 – Campo de tensões.

A figura 5.15 mostra uma vista inferior do protótipo de cadeira, mostrando o campo de tensões equivalente de Von Mises. O nível de tensão é relativamente baixo, embora a carga seja relativamente alta, o que é explicado pela espessura relativamente elevada das peças e raios de concordância. O modelo adotado para a cadeira é benéfico para o seu desempenho estrutural. A rigidez e a resistência mecânica da parte traseira da cadeira também foram analisadas, tendo sido considerada uma carga de 66,6 kgf, uniformemente distribuída ao longo do encosto da cadeira. O valor máximo de tensão equivalente Von Mises encontrado foi de 10 MPa, que é muito inferior à resistência do material (figura 5.15). O valor do deslocamento máximo do componente estrutural do encosto da cadeira encontrado foi de apenas 0,6 milímetros, que é um valor aceitável para o protótipo de cadeira.

No modelo do protótipo da cadeira ilustrado nas figuras 5.14 e 5.15, não foram considerados espaços vazios no seu interior. Uma solução alternativa foi considerada, com espaços vazios internos, em que o material compósito define os limites externos. A espessura do material compósito com fibras de carbono para as paredes considerada foi de 2,34 mm. Deformações significativas foram encontradas, indicando que esta solução não é viável. Uma solução alternativa deve ser proposta, com os espaços vazios cheios com espumas sintáticas, formando um compósito sanduíche. A espuma sintática é relativamente leve e rígida, ideal para evitar as deformações excessivas.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 - Conclusões

Conclusões sobre o comportamento mecânico dos materiais compósitos desenvolvidos para aplicação estrutural

Foram avaliadas as propriedades mecânicas de um conjunto de materiais compósitos de matriz polimérica com diferente número de camadas de carbono (de 1 a 12 camadas de fibra de carbono).

Verificou-se, como era de esperar, que, com o aumento do número de camadas de fibra de carbono, aumentam também, tanto a resistência mecânica (σ_r) como o módulo de elasticidade (E). Observou-se uma pequena dispersão nos resultados experimentais, que pode ser justificada com a técnica de processamento utilizada no fabrico de materiais compósitos. O módulo de elasticidade aumenta significativamente com o número de camadas de carbono, até à camada de carbono 5, estabilizando o seu valor até à camada 12. Com a resistência mecânica passa-se a mesma situação, existindo maior dispersão de valores.

Na caracterização destes materiais compósitos foi, também, utilizada a técnica DMA, para avaliar a evolução do módulo de elasticidade com a temperatura e determinar a temperatura de transição vítrea e, consequentemente, estabelecer as temperaturas de serviço destes materiais.

Foi observada a diminuição do módulo de elasticidade (E) com o aumento da temperatura para os vários materiais estudados, sendo esta diminuição mais efectiva na zona de influência da temperatura de transição vítrea (T_g). A temperatura de transição vítrea obtida foi de cerca de 70°C. Esta avaliação é importante, na medida em que se pode, deste modo, estabelecer a temperatura máxima de serviço.

Foi avaliado o comportamento ao impacto dos materiais compósitos de matriz polimérica com diferente número de camadas de carbono.

Observou-se que, quanto maior é o número de camadas, maior é a energia absorvida pela estrutura de material compósito. Este resultado era esperado, já que a estrutura se torna mais espessa, dificultando a penetração. Verificou-se que a energia absorvida é directamente proporcional à energia de impacto na estrutura com 4 camadas de fibra de carbono e que o mesmo não se verifica para a estrutura com 2 camadas. Este facto deve-se a esta ser de espessura reduzida, ocorrendo a rotura da mesma para as mesmas energias de impacto consideradas.

Conclusões sobre o comportamento das espumas para aplicações não estruturais

Foram estudadas espumas de poliuretano com diferentes concentrações de isocianato e diferentes temperaturas de cura. Foram observadas variações na morfologia das células das espumas com o aumento da temperatura e composição. O número de células abertas das espumas aumenta com a temperatura de cura, para as mesmas composições. Não são visíveis alterações significativas nas dimensões das células das espumas, para as diferentes composições estudadas, mantendo a mesma temperatura de cura.

Através da realização de ensaios DMA, foram obtidos os valores de módulo de elasticidade com a temperatura, para serem relacionados com as condições de processamento, designadamente a temperatura de cura e a percentagem de isocianato. O valor do módulo de elasticidade aumenta significativamente para percentagens de isocianato superiores a 50% (em massa) e aumenta, também, para temperaturas de cura crescentes (de 30 a 100° C). Naturalmente, o módulo será tanto maior quanto menor for a temperatura de serviço destes materiais.

A maior taxa de polimerização observada verificou-se para uma concentração de 40% de isocianato (em massa). A estabilização das taxas de polimerização, para as diferentes concentrações estudadas, ocorreu para um tempo de cura de cerca 20 minutos.

Conclusões sobre o projecto de protótipo

Foi modelado e produzido, utilizando técnicas de prototipagem rápida, um modelo da cadeira. Foi, também, realizado um estudo ergonómico da cadeira, tendo sido utilizado o método RULA. Foi realizada uma análise numérica a partir da representação CAD do protótipo da cadeira. Os valores de tensão equivalente de Von Mises encontrados foram inferiores aos valores de resistência mecânica determinados experimentalmente.

6.2 - Propostas para trabalhos futuros

Apesar de o estudo realizado ter sido orientado para a abordagem dum problema prático concreto e de se ter verificado que os materiais utilizados cumprem satisfatoriamente os requisitos exigidos, foi possível encontrar alguns tópicos que justificam uma abordagem posterior mais detalhada.

Uma solução alternativa deve ser proposta, para enchimento dos espaços vazios do protótipo de cadeira, com espumas sintáticas, formando um compósito sanduíche. A espuma sintática é relativamente leve e rígida, ideal para evitar as deformações excessivas.

Assim, seria de todo o interesse desenvolver/produzir um protótipo da cadeira, para avaliar o seu potencial comercial. Por outro lado, seria interessante realizar um conjunto de ensaios de fadiga dos materiais estruturais, para poder estimar a sua vida útil.

7 REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Strong, A. B., 'Fundamentals of composite Manufacturing', MI: Society Of Manufacturing Engineers, Dearborn, (1989);
- [2] Smith, William F., 'Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais', Ed. McGRAW-Hill, Inc, ISBN : 972-8298-68-4. (1998);
- [3] Zweben, Carl , 'Composite Materials and Mechanical Design, Mechanical Engineer's Handbook', 2nd ed., Myer Kutz, Ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, (1998);
- [4] Schwartz, M. M., 'Composite Materials Handbook', McGraw-Hill Book Company, New York, (1984);
- [5] Moura, Marcelo F.S.F., Morais, Alfredo B. e Magalhães, António G , 'Materiais Compósitos' – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, Publindústria, Porto, (2005);
- [6] Reddy, J. N., 'Mechanics of Laminated Composite', Second edition, Boca Raton, CRC Press, Boca Raton, (2002);
- [7] Silva, Arlindo, 'Propagação de delaminação em compósitos de matriz polimérica'. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, (2001);
- [8] Urugal A C., 'Stress in Plates and Shells', Second edition, McGraw-Hill, New York, (1999);
- [9] Peters, S. T., 'Handbook of composites', Second edition, Chapman & Hall, London, (1998);

- [10] Callister, W. D., 'Materials science and engineering', John Wiley & Sons, New York, (1985);
- [11] Moraes, W. A. e Almeida, J. R., 'Efeito de Impactos Repetidos de Baixa Energia em Compósitos Pultrudados', Polímeros: Ciência e Tecnologia, volume 11, nº 1, páginas 27-34,(2001);
- [12] Brian LEES, 'Materials Information Service', Edited d by Stephen Harmer. (<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=217>);
- [13] Huntsman Polyurethane- (<http://www.huntsman.com/pu>);
- [14] http://www.polyurethane.org/s_api/sec.asp?CID=853&DID=3487 Center for the Polyurethanes Industry of the American Chemistry Council. Arlington.(2007);
- [15] KRÓL, P., 'Synthesis methods, chemical structures and phase structures of linear polyurethanes', Properties and applications of linear polyurethanes in polymer elastomers, copolymers and inomers. Progress in Materials Science. 2007.52(6):P.915-1015;
- [16] Rocha, A., Marques, S., Mateus, A.J. and Bártolo, P.J.S., 'Rapid Prototyping by Reactive Extrusion: Mixing Process', Virtual Modelling and Rapid Manufacturing – Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, P. Bártolo et al, Balkema (Taylor and Francis), Portugal, pp.475-482, (2005);
- [17] Mateus, A., Bártolo, P.J. and Costa, V. 'Physical and numerical modeling of the flow and curing process during reaction injection moulding', International Conference RPD2002, Rapid Product Development, Marinha Grande, Portugal, (2002);

- [18] M. R. Kamal and M. E. Ryan, in, 'Fundamentals of computer modeling for polymer processing', Edited by C. L. Tucker, (Hanser), Munich, (1989);
- [19] Bártolo PJ, 'Photo curing modelling: direct radiation', *int J. Manuf Technol.* In press;
- [20] G. Woods, 'The ICI Polyurethanes Book', John Wiley & Sons, LTD, United Kingdom, (1990);
- [21] M.S. Koo, K. Chung, J.R. Youn, 'Reaction injection molding of polyurethane foam for improved thermal insulation', *Polymer Engineering and Science*, (2001), Vol. 41, 1177-1183;
- [22] Prime, R.B., 'In Thermal characterization of polymeric materials', Vol. 2, Edited by E.A. Turi, Academic Press, London; (1997);
- [23] Beer, Ferdinand P., Johnston e E. Russell, 'Mechanics of Materials', McGRAW-HILL, 2ª edição, (1992);
- [24] Doebelin, E. O., 'Measurement systems – Application and Design', McGraw Hill, New York, (1990);
- [25] ISO 6603/1, 'Plastics – Determination of multiaxial impact behaviour of rigid plastic – Part 1: Failing dart method, (1985);
- [26] Mateus, A., Martinho, P. and Bártolo, P.J. 'Flow and cure modelling of RIM moulding' thermal and flow validation", ANTEC 2006, Charleston, USA, (2006);
- [27] Bártolo PJ, Mitchell G 'Stereo-thermal-lithography', a new principle for rapid prototyping. *Rapid Prototyping J* 9:150-156, (2003);

- [28] David Eaves, 'Handbook of Polymer Foams', Rapra Technology Limited, 2004;
- [29] Oertel G., 'Polyurethane handbook', Munich: Hanser Publishers, ISBN 1-56990-157-0, (1994);
- [30] G.W.H. Hohne, W.F.Hermminger, H.-J. Flammersheim, 'Differential Scanning Calorimetry'- Second Edition: Springer, (2003).